Diretta da

Paolo Rossi

STORIA *della* SCIENZA

1

La rivoluzione scientifica: dal Rinascimento a Newton

GRUPPO EDITORIALE L'ESPRESSO

STORIA DELLA SCIENZA

I contenuti di quest'opera sono tratti da:
Storia della scienza, diretta da Paolo Rossi
© 1988 Unione Tipografico-Editrice Torinese
Corso Raffaello, 28 - 10125 Torino

Edizione speciale realizzata per Gruppo Editoriale L'Espresso

Per questa edizione:

Direzione editoriale: Enrico Cravetto
Consulenza editoriale: Enrico Bellone
Responsabile operativo progetto: Andrea Fava

Coordinamento generale a cura di Istituto Geografico De Agostini
Direttore generale Varia, Illustrati e Iniziative Speciali: Roberto Besana

Iniziative Speciali De Agostini
Direttore: Paolo Andreoni

Realizzazione dell'Opera a cura di: Luca Serafini (responsabile editoriale),
Marco Torriani (coordinamento redazionale),
Maurizio Antonini (coordinamento e progetto grafico),
Gian Lorenzo Forzani (coordinamento tecnico-editoriale)

Indice dei nomi a cura di: Alice Agrillo (Alicubi srl)

Tavole a colori a cura di: GFB EDIT srl

Iconografia delle tavole a colori a cura di. Servizi Editoriali Iconografici De Agostini,
diretti da Ada Mascheroni con la collaborazione di Laura Cavalieri e Maristella Mussini

Edizione non vendibile separatamente da una testata del Gruppo Editoriale L'Espresso
e/o altre testate edite da società controllate e/o collegate al
Gruppo Editoriale L'Espresso S.p.A.
Via Cristoforo Colombo 149 – 00147 Roma

L'Espresso
Direttore responsabile: Daniela Hamaui
Registrazione del Tribunale di Roma n. 4822/55
www.espressonline.it

Le Scienze
Direttore responsabile: Carlo Caracciolo
Registrazione del Tribunale di Milano n. 48/70 del 5 febbraio 1970
Rivista mensile, pubblicata da Le Scienze S.p A.
www.lescienze.it

Copertina Ileana Pace per Obelix s.r.l.
Immagine di copertina: Johann Kepler, *Mysterium Cosmographicon*, Tubinga 1596
(cortesia Giancarlo Beltrame, «La Biblioteca di Babele»)

Stampa e legatura: Mondatori Printing S.p A. – Stabilimento NSM, Cles (TN) – Aprile 2006

Diretta da
Paolo Rossi

STORIA *della* SCIENZA

1

La rivoluzione scientifica: dal Rinascimento a Newton

GRUPPO EDITORIALE L'ESPRESSO

PRESENTAZIONE

La *Storia della scienza* in otto volumi, che viene qui presentata, è una delle opere su questo tema più ampie, approfondite e famose del panorama editoriale italiano e internazionale.

Non «ideologica» come altre altrettanto celebri, questa *Storia* non è però neutrale nel senso della rinuncia a scelte anche impegnative sia in negativo sia in positivo.

Sono infatti stati esclusi il pensiero scientifico antico e medievale e quello orientale, e l'intera opera è dedicata ai secoli e ai temi che vanno dalla cosiddetta rivoluzione scientifica a oggi.

Sono state escluse le scienze umane e sociali (senza peraltro rinunciare agli opportuni riferimenti) e si è concentrata la trattazione su matematica, fisica, astronomia, biologia, chimica.

Sono stati esclusi, naturalmente con alcune indispensabili eccezioni, i "medaglioni" dedicati ai singoli scienziati, e si è articolata l'esposizione per problemi, teorie, esperimenti e risultati.

Di tutte queste esclusioni-inclusioni danno conto, in modo approfondito e dettagliato, le molte pagine introduttive e di raccordo fra le parti, firmate dal direttore dell'opera Paolo Rossi; le migliaia di pagine scritte da dieci fra i massimi conoscitori di ogni disciplina e delle articolazioni tematiche e cronologiche interne a ciascuna, ne corroborano la congruità e il valore euristico: come potrà cogliere ogni attento lettore, anche se si accosterà all'opera per una fruizione indirizzata in particolare solo a qualche aspetto della grandiosa avventura intellettuale che va sotto il nome di storia della scienza.

Direttore editoriale
Grandi Opere Utet
Enrico Cravetto

INDICE SOMMARIO

GLI AUTORI

Paolo Rossi (Urbino 1923), professore emerito presso l'Università di Firenze.

Fernando Abri (Agliana, Pistoia, 1951), professore di Storia della Filosofia presso l'Università di Siena.

Enrico Bellone (Tortona, Alessandria, 1938), professore di Storia della Scienza e della Tecnologia presso l'Università degli Studi di Milano, direttore della rivista «Le Scienze».

Walter Bernardi (Pievelago, Modena, 1948), professore di Storia della Scienza presso l'Università di Siena, sede di Arezzo.

Umberto Bottazzini (Viadana, Mantova, 1947), professore di Storia della Matematica e di Fondamenti della Matematica presso l'Università degli Studi di Milano.

Bernardino Fantini (Nepi, Viterbo, 1947), professore di Storia della Medicina presso l'Università di Ginevra.

Antonello La Vergata (Cosenza 1954), professore di Storia della Filosofia presso l'Università di Modena e Reggio Emilia, sede di Modena.

Stefania Nicasi (Valsola, Como, 1954), psicologa.

Stefano Poggi (1947), professore di Storia della Filosofia presso l'Università di Firenze.

Mario Rossi Monti (Milano 1953), psicoanalista, professore di Psicologia clinica presso l'Università di Urbino.

Eugenio Torracca, professore di Chimica generale e Chimica fisica presso l'Università di Roma Tre.

PREMESSA

di Paolo Rossi

1. Ognuna delle scelte che vengono effettuate nella progettazione e nell'esecuzione di un'opera come la presente comporta non solo problemi di difficile soluzione, ma offre anche (comunque quelle scelte si configurino) vantaggi e svantaggi. Due fra i problemi oggi più noti e discussi possono, in forma interrogativa, essere formulati come segue: 1) è più opportuna una trattazione *settoriale* o una trattazione *unitaria* dello sviluppo storico della scienza? 2) è più opportuna una trattazione che faccia leva sugli elementi interni ad ogni disciplina oppure un'esposizione che sottolinei le relazioni che intercorrono fra quegli sviluppi e le vicende della cultura?

La *storia separata* delle singole e specifiche discipline garantisce in genere una notevole continuità del discorso, rende facilmente accettabili le partizioni cronologiche prescelte (perché in ogni scienza si danno eventi che si configurano come decisivi o «epocali»), dà un senso immediatamente percepibile alla nozione di crescita e di sviluppo. Quella continuità e quell'ordine appaiono tuttavia quasi sempre realizzati al prezzo di un totale o quasi totale isolamento della crescita e del modificarsi delle teorie non solo dai contesti culturali, ma anche dai contemporanei contesti scientifici. Di fatto le singole scienze non crescono in altrettanti compartimenti stagni ma agiscono e reagiscono le une sulle altre. L'isolamento della figura del «fisico» o del «biologo» o del «chimico» come specialista di una disciplina risulta inoltre molto spesso solo da una sorta di «proiezione all'indietro» di categorie e di nozioni elaborate in epoche successive. La cosiddetta *storia unitaria* della scienza sembra ovviare agli inconvenienti ora elencati, sembra garantire la saldatura fra i differenti settori del sapere, ma quanto più essa si amplia, tanto più le periodizzazioni e gli eventi qualificati come «decisivi» in uno specifico settore tendono a configurarsi come arbitrari e casuali. In ogni trattazione unitaria tende a venir fortemente sottovalutato (con conseguenze negative davvero rilevanti) il peso esercitato dalle tradizioni specifiche o «disciplinari» sullo sviluppo storico del sapere scientifico. Quelle tradizioni sono infatti saldamente legate da un lato all'adozione di un linguaggio comune, dall'altro alla consapevolezza di appartenere ad una comunità o ad un gruppo intellettuale che rivendica (all'interno del vasto mondo del sapere) una sua relativa autonomia ed una sua specificità «professionale».

La cosiddetta *storia interna* delle scienze (e siamo così alla seconda delle domande iniziali) tende a tracciare una netta linea di demarcazione tra le argomentazioni razionali e le motivazioni sociali, filosofiche o psicologiche oppure (come erano soliti dire gli epistemologi neopositivisti) fra il contesto della scoperta e il contesto della giustificazione. La storia interna sembra offrire una serie di criteri o regole per il progresso scientifico, ma tende a trascurare in primo luogo la dimensione comunitaria dell'impresa scientifica, in secondo luogo l'incidenza esercitata dalle filosofie e in genere dalla cultura sulla crescita delle teorie. Basta far riferimento a termini come meccanicismo o newtonianesimo o darwinismo per rendersi conto che quei termini designano famiglie di teorie che hanno una portata molto più generale e assai meno «controllabile» di quella che è propria di teorie specifiche come la teoria galileiana della caduta dei gravi o la teoria elettromagnetica di Maxwell. E ci si rende anche conto che quelle teorie più generali e meno controllabili impongono scelte e divieti, stabiliscono ambiti di scientificità che sono indubbiamente collegati a filosofie e a visioni del mondo. L'esclusivo privilegiamento della storia interna tende, al limite, ad una identificazione della storia della scienza con l'epistemologia; meglio con un particolare tipo di epistemologia che privilegia fortemente il momento teorico rispetto a quello sperimentale. La storia della scienza diventa un settore della filosofia della scienza, tende a risolversi integralmente in essa, diventa una ricerca di «casi confortanti». Gli eventi storici diventano solo «esempi», le difficoltà e complessità dei processi vengono eliminate, le incertezze e le vie senza sbocco (che pure furono più volte tentate) vengono cancellate come irreali.

Ma la cosiddetta *storia esterna*, che richiama con forza l'attenzione sugli aspetti comunitari dell'impresa scientifica, che indaga sulle connessioni scienza-società, rischia spesso di trasformarsi in una sociologia della scienza e delle istituzioni scientifiche. Essa tende a trascurare l'analisi delle teorie, il peso delle tradizioni scientifiche, il linguaggio nel quale le teorie vengono formulate. Contro le forme, largamente diffuse nel nostro tempo, di affrettato sociologismo Rupert Hall, Alexandre Koyré, Joseph Ben David (per prendere solo tre nomi fra i più noti) hanno avanzato obiezioni decisive: non furono gli arpenodapti egiziani, che dovevano misurare i campi della valle del Nilo, ad inventare la geometria, ma i Greci che non avevano nulla da misurare; non fu la comparsa del cannone a provocare la nascita della nuova dinamica e proprio sull'esperienza degli artiglieri fallirono i tentativi di Leonardo e di Tartaglia; i progressi decisivi per l'arte della navigazione non vennero da spagnoli e portoghesi, ma derivarono dall'opera di un astronomo nato in Polonia. Al di là di queste specifiche e particolari obiezioni resta, con tutto il suo peso, un'obiezione di fondo: nella prospettiva esternista, la storia

della scienza tende a configurarsi come un ramo della letteratura narrativa, perde ogni sua specificità. Pagine di alta sapienza letteraria riescono a far rivivere climi, ambienti, personaggi, ma si arrestano, come di fronte ad un mondo estraneo e sconosciuto, di fronte a ciò che la scienza ha di proprio, di caratteristico, di specifico: i problemi teorici, le dimostrazioni, le tecniche sperimentali.

2. Di fronte a questo sommario elenco degli aspetti positivi e di quelli negativi degli opposti punti di vista, la soluzione da adottare (o che qui si è cercato di adottare) non è certo quella di una ricomposizione o di una sintesi. È invece quella, abbastanza difficile da perseguire, di una presa di distanza dalle semplificazioni che sono presenti in quelle alternative. Soprattutto negli ultimi decenni, esse si sono fortemente irrigidite fino a configurarsi come vere e proprie dicotomie. Ma come è avvenuto in altri campi di ricerca e relativamente ad altri problemi (per esempio le relazioni mente-corpo, teorico-osservativo, umano-animale, relativismo-realismo ecc.) le contrapposizioni rigide, le coppie oppositionali, il «pensare per dicotomie» e per alternative radicali si sono rivelati strumenti insufficienti e parziali, capaci di funzionare più come ostacoli che come stimoli alla ricerca. Ciò vale indubbiamente anche per alternative che hanno assunto nella storia della scienza un rilievo notevole: tradizione-rivoluzione o continuità-discontinuità. Le tradizioni scientifiche, anche quelle più solide e durature (come l'aristotelismo, il galenismo, il newtonianesimo) sono entità che nascono, hanno una lunga vita e lentamente defungono o vengono dichiarate non più utilizzabili. Anche se hanno al loro interno un nocciolo qualificabile come «inviolabile», quelle tradizioni non sono entità rigide. All'interno di ciascuna di esse sono presenti alternative e le idee si compongono e si ricompongono, si muovono a velocità differente, si diffondono in modi vari e per canali non predeterminabili. Le linee di frattura e le linee di continuità non seguono gli stessi piani e non vanno nelle stesse direzioni.

Basteranno alcuni esempi. Come appare evidente dalle pagine di questa storia della scienza, la schematica contrapposizione fra epigenisti e preformisti serve più a nascondere che a rivelare la varietà delle posizioni presenti nelle grandi dispute settecentesche sull'origine della vita. La tesi di uno scontro frontale fra i sostenitori di un modello corpuscolare e di un modello fluidistico della natura del calore, nel corso del Settecento, ed una riduzione dell'intero dibattito a quell'alternativa, non reggono ad un'analisi ravvicinata. Molti fra i seguaci di Lamarck percepirono come segno di conferma di una salda continuità ciò che a molti apparve, negli anni immediatamente successivi al 1859, un avvenimento rivoluzionario, tale da segnare, nella storia della biologia, una discontinuità radicale. La conferma, nel 1919, della

deflessione di un raggio di luce all'interno di un campo gravitazionale ebbe per molti i caratteri di una brusca svolta, si configurò per altri come la conferma di una lunga sequenza di teorie, inferenze logiche, calcoli. È davvero difficile, e in genere non molto utile far convergere tutto ciò che accade in un'unica grande rottura «epocale» ben delimitabile, rappresentabile nella forma di un'opposizione semplice o mediante la metafora di un crepaccio che interrompe la storia.

Tutto ciò non ha nulla a che fare con il cosiddetto *continuismo*, ovvero con la negazione dell'esistenza e della portata delle cosiddette rivoluzioni scientifiche. Che sono invece frequenti (la loro frequenza tende a crescere), decisive, reali. Ha invece a che fare con l'impossibilità di tracciare schematiche linee di confine, con la difficoltà (tanto per fare un esempio) ad accettare massicce e impegnative tesi di filosofia della storia del tipo di quella che caratterizza ogni età sulla base di un «paradigma dominante». Non è vero (o comunque non è né ovvio né dimostrabile) che ogni età abbia avuto un suo inconfondibile volto o una sua specifica *episteme*. Attraverso la ricerca storica non si scoprono mai epoche o stadi mono-paradigmatici. Il dialogo critico fra teorie, tradizioni scientifiche differenti, ideologie, immagini della scienza, metodi di ricerca, è stato sempre (così come è nei nostri anni) continuo e insistente. Ludwik Fleck paragonò una volta l'impresa dello storico della scienza al tentativo di dar conto di un'animata discussione nella quale più persone parlano contemporaneamente cambiando spesso interlocutore. Si può allargare questa metafora aggiungendo che spesso le lingue sono diverse e sono presenti problemi di traduzione, che il gruppo è arricchito dalla presenza di interpreti più o meno legittimati (alcuni dei quali parlano a voce altissima), che alcuni membri del gruppo disputano sui contenuti, mentre altri, in disaccordo tra loro, enunciano presunte regole della conversazione e dettano norme rispettando le quali il gruppo vivrebbe per sempre armonioso e felice. Ciò non toglie che il compito dello storico della scienza debba *anche* tendere a dare un senso a quella discussione, a coglierne gli sbocchi e le linee di tendenza, a individuare, nei singoli discorsi, passaggi obbligati, elementi di coerenza ed incoerenza, a chiarire la presa che quei discorsi ebbero sulla cultura e sui modi di pensare, a dire qualcosa sulla capacità che quei discorsi ebbero di fare affermazioni vertenti non solo su altri discorsi, ma sul mondo reale.

3. I chiarimenti fin qui tentati sembravano in qualche modo necessari. Ma la consapevolezza del carattere provvisorio e parziale di ogni possibile scelta di metodo induce a ritenere che la premessa a quest'opera non debba consistere in un improbabile «discorso sul metodo», ma in un tentativo di dar conto al lettore di alcune delle scelte che sono state concordemente

effettuate. Al fine di eliminare possibili equivoci, di non lasciare che tali scelte «operino nascostamente», tenterò nelle pagine che seguono non tanto di *giustificarle* quanto di *enumerarle* con la massima brevità e chiarezza possibili.

1) Una prima scelta concerne gli ambiti cronologici e geografici. Aver assunto come data di inizio l'età di Copernico e come ambito geografico la scienza dell'Occidente, non implica affatto un'adesione alla tesi di una inesistenza della scienza greca e medioevale, indiana e cinese. Gli affreschi troppo ambiziosi, i panorami troppo generali nascondono spesso tendenze alla genericità. Si rivolgono spesso a un pubblico che si presume preferisca sempre e in ogni caso un sommario «resoconto della totalità» ad analisi di processi intellettuali determinati. Anche riconoscendo l'esistenza di opportunità, per così dire «esterne», che hanno condizionato questa scelta, andrà ricordato che la scienza, come impresa comunitaria, emerge lentamente, con i suoi specifici caratteri moderni, nel corso della cosiddetta Rivoluzione scientifica. Le Università medioevali preparavano, com'è noto, all'esercizio della professione ecclesiastica, della giurisprudenza, della medicina. La condizione dello «scienziato», nell'età di Copernico e di Cardano, è ancora quella dell'intellettuale medioevale: o uomo di Chiesa, o professore, o medico. La solidità e la continuità delle grandi tradizioni matematiche, astronomiche e mediche presenti nel mondo antico e medioevale rendono certo del tutto legittimo parlare di scienza relativamente a quelle età. Ma va anche ricordato che si tratta in ogni caso, secondo un'efficace espressione usata da grandi storici, di «una scienza senza scienziati». La nozione di rivoluzione scientifica (concordemente applicata alle vicende intellettuali dei secoli XVI e XVII) non indica solo l'emergere di novità e di scoperte nei singoli settori della scienza. Designa anche una serie di mutamenti profondi attraverso i quali ebbe a costituirsi *una specifica forma del sapere* destinata a condurre alla identificazione dell'attività di ricerca scientifica con una professione. La figura del «virtuoso», del ricercatore scientifico, dello scienziato (nel senso moderno del termine) emerge in tempi e modi diversi nei singoli settori della ricerca: in alcuni casi, particolarmente nell'astronomia e nella matematica, ci si richiama a tradizioni antichissime; si tenta, in altri casi, di far emergere dal passato specifiche tradizioni alle quali richiamarsi; si insiste, in altri casi ancora, sul carattere radicalmente nuovo (come si direbbe oggi, alternativo rispetto al sapere tradizionale) della propria attività conoscitiva e sperimentale. Un punto sembra non soggetto a dubbi: solo la modernità dà luogo a quel tipo di sapere, che chiamiamo ancora oggi *scienza*. A differenza di quanto era avvenuto in Occidente in epoche storiche precedenti e di quanto era avvenuto in altri ambiti geografici, quel sapere congiunge insieme le teorie e gli esperimenti, le «sensate esperienze» e le «certe dimostrazioni»; trova sue specifiche forme istituzionali; elabora suoi

specifici linguaggi; assume (pur nella varietà degli atteggiamenti e delle dottrine) comuni riferimenti a valori tipicamente «moderni». Essi riguardano: la irrilevanza dell'appello alle autorità e il rispetto dei fatti; l'autonomia delle convinzioni scientifiche rispetto a quelle religiose o politiche; la trasmissibilità dei metodi e la pubblicità dei risultati; l'accettazione della regola secondo la quale le teorie e le tesi che si annunciano, per essere considerate *vere* devono essere sottoposte al «pubblico» controllo degli esperimenti, al confronto e alla discussione con teorie e tesi alternative.

II) Una seconda scelta concerne il ventaglio di significati del termine *scienza*. Non si contesta affatto l'opportunità di estendere questo termine ad ambiti di ampiezza sempre maggiore. Escludere da una trattazione ampia e dettagliata, come qui si è fatto, le scienze umane o sociali non implica né una loro esclusione di principio dall'ambito della scientificità, né, tantomeno, l'accettazione di una inesistente separazione fra «culture» differenti. Ogni volta che la trattazione lo ha reso necessario si sono fatti gli opportuni riferimenti. L'esclusione dipende certo dall'esigenza di mantenere questa storia della scienza entro dimensioni fisiche accettabili, ma è principalmente legata alla constatazione che esistono ottimi manuali di storia della medicina, dell'economia, dell'antropologia, che esistono ottime storie della cultura e delle relazioni fra scienza e pensiero filosofico, ma che non sembrano invece finora disponibili storie della scienza nelle quali siano trattate, con l'ampiezza e l'analiticità qui presenti, le scienze matematico-naturali. I vasti territori qui indagati corrispondono a quei complessi disciplinari che vanno sotto il nome di matematica, fisica, astronomia-cosmologia, biologia, chimica, nonché a quei problemi che sono oggi oggetto di trattazione delle cosiddette neuroscienze. In ciascuno di questi settori la analiticità e (se mi è consentito usare questo termine) la profondità della trattazione hanno obbedito, più che a criteri di uniformità, a criteri di esemplarità.

III) Una terza scelta riguarda il pubblico al quale l'opera si rivolge e per il quale è stata scritta. Si è evitato ogni inutile tecnicismo e ci si è sforzati di esporre ed analizzare i problemi (anche quelli più difficilmente accessibili) con la massima chiarezza. Ma si è rinunciato in partenza al modello (assai discutibile anche se molto diffuso) di una storia della matematica scritta senza *nessun* ricorso ai simbolismi e di una storia della fisica nella quale non fanno *mai* la loro comparsa le equazioni. L'idea che si possa dar conto di teorie senza *mai* servirsi del linguaggio nel quale esse sono state formulate è fondata sulla inaccettabile tesi di una piena separabilità fra quelle teorie e quello specifico linguaggio. Applicata alla letteratura, questa tesi comporterebbe quella della comprensibilità della *Commedia* di Dante attraverso la lettura di un suo riassunto in inglese. Per questo, anche grandi enciclopedie che si rivolgono ad un largo pubblico hanno lasciato, negli ultimi decenni,

giusto spazio ai simboli e alle formule. Come quelle nuove enciclopedie, anche la storia della scienza ha oggi (in Italia e fuori) un pubblico molto largo. Esso non è più, come un tempo, formato solo o prevalentemente da laureati in lettere e in giurisprudenza, ma anche da matematici, fisici, biologi, psicologi, chimici, medici, studiosi di informatica, tecnici di vario tipo e natura. Quest'opera è stata scritta sia per il pubblico tradizionale, sia per quello che si è affacciato più di recente a questo tipo di interessi e di letture.

IV) Una quarta scelta riguarda le partizioni cronologiche adottate. La principale fra di esse corrisponde (con tutte le eccezioni e le sfumature del caso) alla tripartizione in volumi. Il primo volume riguarda il periodo compreso fra la metà del Cinquecento e la fine del Settecento. Il secondo va dalla fine del Settecento agli anni Ottanta dell'Ottocento. Il terzo è dedicato agli ultimi cento anni. Per chi preferisca simboli diversi da quelli delle date (ma altrettanto semplificanti) la tripartizione corrisponde ai periodi storici che intercorrono fra Copernico e il trionfo e la diffusione della scienza newtoniana; tra Lagrange e Maxwell; tra Frege e gli sviluppi della fisica relativistica e quantistica. Dal punto di vista di una storia sociologica della scienza, il primo volume coincide con la nascita delle prime accademie scientifiche, con l'egemonia della scienza italiana e successivamente inglese, si chiude con la fondazione delle *Grandes Écoles* e con l'egemonia della scienza francese; il secondo volume ha a che fare con l'esaurirsi di tale egemonia, con le università della Germania e con i processi di professionalizzazione della scienza, con l'egemonia della scienza tedesca; il terzo volume tratta del passaggio alla «Grande Scienza», della crescita della scienza negli Stati Uniti e della loro egemonia, della diffusione della scienza su scala planetaria. I titoli scelti per ciascun volume: *Dalla rivoluzione scientifica all'età dei lumi*; *Dall'età romantica alla società industriale*; *Il secolo ventesimo* colgono, con la forte dose di approssimazione che è implicita in questo tipo di operazioni, alcuni aspetti del discorso fin qui condotto.

V) Una quinta scelta concerne gli intrecci e gli incroci fra discipline diverse e i rapporti fra i personaggi (quelli che un tempo si chiamavano «gli eroi del pensiero») e le discipline. In quest'ambito, che è fra i più delicati e difficili, si sono adottate soluzioni abbastanza radicali. Fatta eccezione per sei scienziati (Galilei, Newton, Faraday, Darwin, Maxwell, Einstein), che sono diventati ciascuno il simbolo di una rivoluzione, quest'opera non contiene capitoli espressamente dedicati all'opera e al pensiero di singoli individui. Le storie della scienza composte da medaglioni di personaggi tendono sempre ad assomigliare a gallerie che contengono i ritratti (un po' polverosi) degli antenati entro le quali si introducono ospiti desiderosi solo di affrettarsi verso una (in questo caso inesistente) sala da pranzo. Si è qui scelta una via diversa: seguire il movimento e l'articolazione dei problemi, delle teorie, degli

esperimenti, analizzare le scelte compiute e i risultati raggiunti. Questo tipo di trattazione comporta inevitabilmente che uno stesso autore (ivi compresi i «sommi» prima elencati) compaia in più luoghi dell'opera, si riaffacci in differenti capitoli, ritorni ad essere analizzato e discusso in contesti problematici diversi e sullo sfondo di differenti tradizioni disciplinari. Ciò risulta particolarmente evidente nelle parti dedicate ai periodi storici antecedenti alla cosiddetta professionalizzazione della scienza e al costituirsi di comunità scientifiche consolidate. Questa stessa pluralità di sfondi è necessaria anche per dar conto di quegli incontri fra discipline diverse che hanno generato, come più volte è accaduto, nuove scienze.

Il tipo di trattazione di cui si è detto rende più viva e stimolante la lettura, un po' più difficile la consultazione. Poiché, in un buon manuale, la lettura non esclude necessariamente la consultazione, il lettore va avvertito che quest'ultima richiede l'uso dell'indice dei nomi (che rinvia nella maggioranza dei casi anche agli argomenti) ed un'attenzione non marginale ai rimandi fra i capitoli. Solo attraverso l'indice è possibile rendersi conto della pluralità dei luoghi nei quali un singolo autore o uno specifico problema sono stati trattati. La trattazione di Galilei (sia detto a titolo di esempio) non si esaurisce nel capitolo VII del primo volume, ma rinvia al capitolo IV per la scoperta delle nuove stelle; al capitolo V per la trattazione dei problemi relativi al continuo e all'infinito; al capitolo XI per il rifiuto dell'antropocentrismo. Lo stesso vale per Bacone, Descartes e per Newton il cui capitolo è da integrare con il capitolo XVI (per le flussioni), con il capitolo XIX (per la chimica), con il capitolo XXVII (per il rapporto filosofia naturale-teologia).

VI) Una sesta scelta riguarda i rimandi e le informazioni sulle edizioni e gli studi. Le sterminate, confuse ed illeggibili bibliografie che accompagnano molti manuali servono solo a disorientare il lettore. Le bibliografie, qui poste al termine di ogni capitolo, non hanno alcuna pretesa di completezza. Vogliono solo essere uno strumento per un lettore non specialista: da un lato fanno riferimento ai testi e agli studi dei quali ci si è effettivamente serviti, dall'altro vogliono indicare alcuni punti di riferimento essenziali per un approfondimento dei temi indicati.

VII) C'è infine un avvertimento che, agli occhi di chi scrive, è molto importante. Esso riguarda le *Introduzioni* a ciascuno dei tre volumi intitolate *Le istituzioni e le immagini della scienza*. Tali introduzioni svolgono una essenziale funzione di raccordo, ma non hanno alcuna pretesa né di completezza né di originalità. Tantomeno intendono presentarsi come una «storia delle immagini della scienza», dato che quest'ultima coinciderebbe con una larghissima parte della storia della filosofia occidentale da Bacone a Heidegger. In quelle pagine si è fatto riferimento alle «immagini» solo in funzione di uno schizzo di storia delle istituzioni. Indicando di volta in volta

le fonti utilizzate, mi sono limitato a presentare a un pubblico di non specialisti una serie di dati e di risultati ai quali sono pervenuti, sul tema delle istituzioni scientifiche, alcuni storici di quelle istituzioni e alcuni fra i maggiori studiosi di sociologia della scienza.

4. L'opera che viene ora sottoposta al giudizio dei lettori è frutto del lavoro e della collaborazione di un gruppo di studiosi di storia della scienza che hanno iniziato a lavorare a quest'impresa all'inizio del 1982 (brevi notizie bio-bibliografiche relative ai collaboratori sono contenute nelle pagine che immediatamente seguono questa premessa). Essi appartengono a generazioni diverse ed hanno, com'è naturale, non solo diverse competenze, ma anche differenti (il che non vuol dire necessariamente divergenti) orientamenti filosofici e culturali. Al di là delle comuni scelte alle quali ho sopra fatto riferimento, hanno tuttavia in comune idee, orientamenti e atteggiamenti intellettuali che non sarebbe agevole elencare senza immediatamente suscitare nell'intero gruppo appassionate e non necessariamente pacate discussioni. Anche senza entrare qui in un'analisi dei numerosi oggetti di consenso, mi sembra giusto sottolineare quattro punti: che si è fatto tutto il possibile per giungere ad una reale collaborazione e ad una reciproca integrazione dei punti di vista; che si è concordemente cercato di resistere alla tentazione di trasformare la storia della scienza in una storia «filosofica» della scienza; che si è tentato di costruire una storia capace di dar conto, insieme e contemporaneamente, dell'esistenza dei *problemi* e di quella delle *teorie*, capace di mostrare che la soluzione di determinati problemi rivela spesso l'esistenza di problemi inaspettati; che l'entusiasmo con il quale fu inizialmente accettato l'invito a partecipare ad un'opera da me coordinata e diretta si è mantenuto intatto (come assai raramente avviene in questo genere di imprese) nel corso di molti anni.

Soprattutto per questo mi è qui davvero gradito ringraziare Ferdinando Abbri, Enrico Bellone, Walter Bernardi, Umberto Bottazzini, Bernardino Fantini, Antonello La Vergata, Stefania Nicasi, Stefano Poggi, Mario Rossi Monti ed Eugenio Torracca.

Anche a nome di tutti questi amici ringrazio poi tutte quelle persone di differenti sesso ed età che hanno dato prova di un notevole spirito di sopportazione nei confronti di quanti si erano impegnati in una di quelle imprese «che fanno di continuo oscillare l'animo fra l'entusiasmo e la disperazione».

LA RIVOLUZIONE SCIENTIFICA: DAL RINASCIMENTO A NEWTON

Introduzione. *Le istituzioni e le immagini della scienza*
(di PAOLO ROSSI)

1. *Le Università.*

Nel latino dei secoli XII e XIII, che videro la nascita delle Università, il termine con il quale si può designare la moderna «Università degli studi» come luogo di elaborazione e trasmissione del sapere è *Studium*. Le *universitates* erano associazioni di persone (non c'era nel termine alcun riferimento alla «universalità della cultura»). Fra le molte *universitates* o associazioni del tempo ve n'erano alcune che associavano insieme persone dedite professionalmente allo studio e all'insegnamento se si trattava di una *universitas magistrorum* (secondo il modello parigino), o persone dedite soltanto (e in via provvisoria) allo studio, se si trattava di una *universitas scholarium* (secondo il modello bolognese) (Arnaldi 1974, 7). Dal XIII al XVI secolo l'Università conserva la stessa struttura piramidale delle facoltà: le arti come facoltà propedeutica; la teologia, il diritto, la medicina come facoltà superiori. Si conservano la stessa struttura corporativa, lo stesso metodo di insegnamento fondato sulla *lectura* e sulla *disputatio*, lo stesso sistema di gradi universitari (baccellierato, licenza, dottorato) e di diplomi (Stelling-Michaud 1974, 156).

Geometria e dinamica erano state, fino al Cinquecento, oggetto di studio dei filosofi. La grande scienza medioevale, elaborata da coloro che venivano un tempo designati come «i precursori di Galilei», aveva trovato espressione prima a Oxford, presso i maestri del Merton College, poi a Parigi. Nel corso del secolo XIV il centro degli studi filosofico-scientifici si spostò a

Padova e nelle Università tedesche e olandesi (Le Goff 1959, 161-178). Le prime cattedre di matematica, astronomia, fisica aristotelica, filosofia naturale risalgono ai secoli XIV e XV. Ma l'insegnamento della filosofia (come pure quelli di teologia, diritto, medicina) non solo occupava nella vita accademica un posto di maggior rilievo, ma era anche collocato in una posizione più alta nella gerarchia del sapere. Il passaggio da un insegnamento di matematica ad uno di filosofia si configurava come una promozione. Ciò non poteva certo contribuire a rafforzare l'immagine che gli «scienziati» del tempo avevano di se stessi. Finché un professore di matematica poteva essere assunto da un'Università come professore di matematica solo se già in possesso di una laurea in teologia, medicina o giurisprudenza; finché le possibilità di carriera erano legate non solo al suo lavoro in matematica, ma alla sua eccellenza in molti altri campi, non esistevano incentivi sufficienti a concentrare alte dosi di energie su argomenti «scientifici» (Ben David 1975, 92).

Fino ad anni recenti si era soliti contrapporre con molta decisione la decadenza e il conservatorismo delle Università al lavoro svolto, nelle prime accademie e società scientifiche, da virtuosi, dilettanti, tecnici e artigiani colti. Ci si è resi conto che quel quadro non era falso, ma presentava elementi di unilateralità e aveva condotto a irrigidimenti eccessivi. La stessa forza e persistenza della polemica contro le Università valgono a mostrare il peso che esse esercitavano sulla cultura. Una larga richiesta di nuove Università giunse dal mondo protestante e le richieste non avevano solo motivazioni teologiche. Poiché nella scienza del Rinascimento le Università esercitarono senza dubbio un ruolo non trascurabile (Boas 1982, 55, 63), è opportuno delineare brevemente, sulla traccia di uno studio di Charles Schmitt (che si riferisce alle Università italiane), la struttura e le caratteristiche delle Università all'inizio del Rinascimento.

L'interesse maggiore delle Università italiane era rivolto al diritto e alla medicina, mentre nell'Europa del Nord si dava più importanza alla teologia e alle arti liberali. Studenti italiani andavano a studiare teologia a Oxford e a Parigi. Molti studenti varcavano le Alpi per venire a studiare legge e medicina in Italia. Delle tre grandi Facoltà, quella di legge era la più importante sia in termini di prestigio e di remunerazione dei docenti, sia in termini di numero degli studenti. Professori e studenti di teologia erano, in genere, pochi in numero, ma le ridotte dimensioni non impedivano che la Facoltà di teologia esercitasse un'influenza notevolissima. Nella Facoltà di medicina, lo studente poteva conseguire una laurea in «arti» o in «filosofia», oppure proseguire verso la laurea in medicina, talvolta chiamata in «arti e medicina» oppure in «filosofia e medicina». La durata degli studi era di cinque anni e il curriculum diviso in due parti. Nella prima (corrispondente ai primi due

anni) venivano seguiti corsi di logica (gli *Analitici secondi* di Aristotele) e di filosofia naturale (fondata su opere come la *Fisica*, il *De anima*, il *De generatione et corruptione*, i *Parva naturalia*). La parte teorica e la parte pratica della medicina venivano studiate contemporaneamente, nel triennio successivo, sulla base dei testi di Ippocrate, Galeno, Avicenna. L'insegnamento delle arti poteva anche includere matematica, materie umanistiche e filosofia morale. Anatomia e chirurgia tendevano a configurarsi come discipline autonome e lo stesso accadeva per la botanica. Nel corso del Cinquecento quest'ultima giunge a rendersi completamente autonoma (Schmitt 1979, 47-51 e cfr. Stelling-Michaud 1974; cfr. tabella 1).

TABELLA 1. — *Numero delle cattedre retribuite in alcune università, per disciplina (1400-1700).*

	1400	1450	1500	1550	1600	1650	1700
Bologna							
Scienza	3(*a*)	—	2(*b*)	2	2	2	2
Medicina	11	2	3	3	5	5	3
Altre	33	9	16	16	20	22	23
Parigi (Sorbona e Collège de France)							
Scienza	—	—	—	2(*c*)	2	2	2
Medicina	—	—	—	2	3	3	3
Altre	—	—	—	8	12	18	20
Oxford							
Scienza	—	—	—	—	—	3(*d*)	3
Medicina	—	—	—	1	1	2	2
Altre	—	—	—	15	15	20	20
Lipsia							
Scienza	—	—	—	—	2(*e*)	2	2
Medicina	—	2	2	3	4	4	6
Altre	—	—	—	—	17	17	23

(*a*) Astrologia; filosofia naturale; fisica.
(*b*) Aritmetica e geometria; astronomia.
(*c*) Matematica.
(*d*) Filosofia naturale; geometria, astronomia.
(*e*) Aritmetica e astrologia; fisica e filosofia naturale.

Fonte: Riprodotta da Ben David, 1975, p 91

L'insegnamento della matematica occupava, nel curriculum universitario, un posto secondario. Nella seconda metà del Cinquecento, Bologna aveva una media di 22 insegnanti di medicina. Nel 1590 c'erano a Pisa nove

insegnanti di medicina. A Padova, nel 1592, ce n'erano 11. Si è calcolato che per ogni dozzina di medici insegnasse, nelle maggiori Università, un solo matematico. Il termine «matematico» copriva inoltre, nei curricula cinquecenteschi, un arco di discipline comprendente astrologia, astronomia, ottica, meccanica, geografia. Intorno alle cattedre di matematica andò di conseguenza raggruppandosi un certo numero di discipline scientifiche. Il termine *cosmographia*, che fa la sua comparsa a Ferrara alla metà del Cinquecento, comprendeva geografia e astronomia tolemaiche. Molti studi (Schmitt 1979, 62) hanno documentato le numerose «incursioni» compiute da matematici nel regno della filosofia e delle scienze naturali.

La presenza degli insegnamenti teologici andò fortemente crescendo dopo il Concilio di Trento. Prima del 1550 Bologna aveva una sola cattedra di teologia. Nel 1580 le cattedre erano tre, nel 1600 sei, nel 1650 nove (Dallari 1888-1924; Schmitt 1979, 78).

La posizione fortemente critica che assunsero verso le Università Francis Bacon (1561-1626) e René Descartes (1596-1650) è molto nota (cfr. cap. I, 3). Soprattutto in Inghilterra la critica di Bacon darà luogo a sviluppi significativi. Gli esponenti del movimento puritano attaccarono con violenza sia l'insufficienza dei contenuti dell'insegnamento sia l'arretratezza dei metodi di trasmissione del sapere. Il tentativo di introdurre nelle Università nuove scienze tendeva non solo a favorire le applicazioni pratiche e le «invenzioni», ma anche ad allargare la cerchia dei destinatari dell'istruzione. Fra lo scoppio della guerra civile, nel 1642, e l'accettazione da parte di Cromwell della carica di «Protettore» (1654), escono una serie di scritti che ripropongono con forza il tema delle Università: *Of education* (1642) di John Milton, la *Humble motion to the Parliament concerning the advancement of learning and reformation of the Universities* (1650) di John Hall, *The reformed school* di John Dury (1650), l'*Academiarum examen* di John Webster (1654). Ma anche Thomas Hobbes, nel *Leviatano* (1650), aveva affermato che nelle Università la filosofia si identificava con l'aristotelismo, la geometria non veniva presa in considerazione, la fisica offriva solo vaniloqui e non spiegazioni. Agli studenti delle Università, aveva scritto l'anno precedente John Hall, non si insegnano né la chimica, né l'anatomia, né le lingue, né gli esperimenti: «è come se i giovani avessero appreso tremila anni fa tutta la scienza egiziana redatta in geroglifici e poi avessero sempre dormito come mummie per risvegliarsi solo adesso» (Giuntini 1979, 97-100).

La lunga lotta per l'indipendenza, la struttura decentrata del governo, la fama internazionale di paese tollerante e liberale avevano creato nei Paesi Bassi una situazione molto diversa. La popolazione era uno straordinario miscuglio di nazionalità. Come scrisse nel 1653 l'inglese Andrew Marvel in un poema intitolato *The. Character of Holland*:

Amsterdam Turca, Cristiana, Pagana, Giudea
Crogiolo di sètte e zecca di scismi si fece
Quella *banca della coscienza*, dove sin la più strana
delle opinioni può trovar credito e scambio
(Hackmann 1979, 112).

Guglielmo d'Orange vide nella creazione di un sistema di istruzione superiore uno dei mezzi necessari alla realizzazione dell'unità nazionale e la sua politica fu ripresa dagli Stati Generali. Nel 1575 fu fondata l'Università di Leida, nel 1614 quella di Groningen, nel 1636 quella di Utrecht. La situazione finanziaria era buona. Con alti stipendi vennero attirati numerosi professori stranieri: per tutto il secolo XVII insegnarono a Groningen 34 stranieri su un totale di 52 professori. Anche molti studenti venivano dall'estero: fra il 1575 e il 1835 studiarono medicina a Leida 4.300 studenti di lingua inglese. L'insegnamento della filosofia cartesiana fu proibito nel 1656, ma non dominavano certo impostazioni tradizionalistiche, come è mostrato dalla rapida penetrazione delle tesi antiaristoteliche di Pietro Ramo (1515-1572).

Anche nei Paesi Bassi, come in tutto il resto dell'Europa, le Università non erano tuttavia la sede della scienza. Christiaan Huygens (1629-1695) aveva studiato all'Università, ma ruppe con la tradizione accademica. Antony van Leeuwenhoeck (1632-1723) era un negoziante di tessuti. Isaac Beeckman continuò a lungo l'attività del padre che era un commerciante di candele. Nelle Università olandesi non si apprendeva nessuna di quelle attività per le quali gli Olandesi erano famosi e celebrati nel mondo: fabbricare macchine e strumenti di precisione, costruire navi, prosciugare terreni, aprire canali, erigere dighe (Hackmann 1979, 109-113).

Quella grande stagione della civiltà europea che fu l'Umanesimo non ebbe, sulle istituzioni universitarie, gli stessi effetti sconvolgenti che aveva avuto, a suo tempo, la cosiddetta «rinascita del secolo XII». Sarà la rivoluzione scientifica a dar vita a vere e proprie alternative alla cultura universitaria, a creare «luoghi» diversi di costruzione e di trasmissione del sapere (Arnaldi 1974, 14).

2. *Le Accademie.*

Nonostante le opportune correzioni alla tradizionale e troppo rigida contrapposizione Università-Accademie, la tesi tradizionale relativa al carattere marginale delle Università nella Rivoluzione scientifica conserva una indubbia verità. Anche se quasi tutti gli scienziati del Seicento e del Settecento hanno studiato in un'Università, sono pochi i nomi di scienziati la cui carriera si sia svolta per intero o prevalentemente all'interno dell'Univer-

sità. Le Università, almeno fino alla metà dell'Ottocento, *non* furono al centro della ricerca scientifica. La scienza si trasformò invece, nel corso del Seicento, in una attività sociale organizzata e si dette sue proprie istituzioni. L'idea di un istituto *di ricerca* è un'idea scientifica più che umanistica e letteraria. Essa comporta che il fine dell'istituzione sia non la diffusione, ma l'avanzamento del sapere e che tale avanzamento sia realizzabile attraverso il lavoro di un gruppo o di una équipe sotto la guida di un direttore. L'Istituto di ricerca è un fenomeno ottocentesco anche se, naturalmente, è possibile trovare, come si usava dire un tempo, «precorrimenti»: per esempio l'osservatorio fondato da Tycho Brahe (1546-1601) a Uraniborg nel 1576 o l'Osservatorio di Parigi diretto da Gian Domenico Cassini (1625-1712).

Le Accademie che presero vita nel Seicento, anche le maggiori, non erano istituti di ricerca nel senso moderno del termine. Non si ponevano come scopo la trasmissione del sapere. Erano luoghi dove venivano scambiate informazioni, discusse ipotesi, analizzati e realizzati in comune esperimenti, soprattutto emessi valutazioni e giudizi su esperimenti e memorie presentate dai soci e da individui esterni al gruppo. È anche necessario guardarsi dal proiettare su tutte le Accademie, soprattutto su quelle del Cinquecento e del primo Seicento, le caratteristiche delle più tarde (e più familiari) accademie scientifiche. Non converrà tuttavia per questo dimenticare un dato importante: il carattere di *rinuncia al lavoro solitario* che comunque caratterizza il costituirsi in gruppo dei dotti.

Con il termine *Accademia*, scriveva Girolamo Tiraboschi alla fine del Settecento, «intendo quelle società di uomini eruditi, stretti fra loro con certe leggi a cui essi medesimi si soggettano, che radunandosi insieme si fanno a disputare su qualche erudita questione, o producono e sottomettono alla censura dei loro colleghi qualche saggio del loro ingegno e dei loro studi». Riunioni, elaborazione di regole di comportamento, critica dei prodotti altrui sono tre elementi che vanno sottolineati. Alle radice delle Accademie sta una domanda di lavoro collettivo, che sfocia nella costruzione di un *soggetto collettivo*, sta soprattutto l'esigenza di sottoporre i prodotti dell'ingegno alla critica degli altri e ad un pubblico controllo. L'istituzione si dà essa stessa le sue regole: «si struttura come una microsocietà mimetica della società reale» (Quondam 1981, 22-23). Essa coopta i suoi membri attraverso una sorta di «rito di passaggio» che spesso assegna ai membri un nuovo nome, si stabilisce come un «territorio neutrale», con sue proprie regole, all'interno di una più vasta, turbolenta ed agitata società (*Ibid.*).

Il nome stesso che molte accademie si scelgono da un lato dà espressione al metodo della ricerca ed ai fini che si perseguono (Lincei, Investiganti, Cimento, Traccia, Spioni, Illuminati ecc.), dall'altro fa in alcuni casi riferimento alla separatezza fra l'accademia e la società rivelando anche il

clima di persecuzione-opposizione che caratterizza alcune situazioni culturali (Incogniti, Segreti, Animosi, Affidati ecc.) (Quondam 1981, 43; Ben David 1975, 108; cfr. tabella 2).

3. *I Lincei, il Cimento, gli Investiganti.*

La prima organizzazione definibile (pur con tutti i limiti che vedremo) come società scientifica, non è l'*Academia Secretorum Naturae*, creata a Napoli da Giambattista della Porta (morto nel 1615), ma l'Accademia dei Lincei che ebbe origine nel 1603 dall'associazione del marchese Federico Cesi (allora diciottenne) e di tre suoi giovani amici fra i quali, in posizione preminente, il medico olandese Joannes van Heeck. I primi obblighi assunti dai soci consistevano nell'impegno a studiare insieme e ad impartirsi lezioni. L'ostilità dei familiari del Cesi costrinse gli amici a separarsi, ma l'Accademia riprese vita nel 1609. Nel 1610 entrò a farne parte Giambattista della Porta (1535-1615), nel 1611 Galileo Galilei (1564-1642).

La presenza di due personaggi tanto diversi, assertori di visioni del mondo fra loro inconciliabili (cfr. I, 1), è stata considerata da alcuni studiosi il simbolo di una assenza di lucidi programmi. Ma il clima di segretezza, gli iniziali orientamenti «paracelsiani» (van Heeck aveva definito i soci «sagacissimi indagatori delle scienze e dediti alla disciplina paracelsica») non bastano a togliere significato agli intenti del Cesi di «leggere questo grande, veridico et universal libro del mondo» per «rappresentarsi le cose come sono» e di «sperimentare per alterarle et variarle». Secondo i progetti del Cesi un dettagliato statuto, il *Linceografo*, avrebbe dovuto regolare, in modo estremamente minuzioso, l'ammissione all'Accademia e la vita degli Accademici. Quel testo non fu mai edito e trovò scarsa applicazione pratica. Fu tuttavia sempre seguita la regola che vietava a un Linceo la contemporanea appartenenza a un ordine religioso.

Le Accademie, si è detto, sono delle microsocietà che operano all'interno di una più ampia e articolata società. Come poi tutte le Accademie scientifiche, i Lincei tendevano ad affermare (in un ambito limitato) i diritti di un sapere autonomo, sostenendo di conseguenza la non conflittualità fra scienza e fede e fra scienza e società. I Lincei «hanno per constitution particolare sbandita da' loro studij ogni controversia fuor che naturale e matematica, e rimosse le cose politiche come poco grate, e con ragione, a' superiori» (cfr. Olmi 1981, 193). I richiami alle matematiche e alle esperienze naturali, la polemica contro le Università, il desiderio di differenziarsi nettamente dalle Accademie letterarie, la valorizzazione degli artigiani (contrapposti ai «maestri cattedratici e magniloquenti»), la forte insistenza sul carattere «pubblico» del sapere sono tutti elementi che

TABELLA 2. — *Le Accademie Italiane.*

Nome	Città	Data	Impresa	Indizi	Leggi	Nomi	Stampe	Privata	Pubblica	Istruzione	Attività
Fenici	Milano	ca 1550	1	0	1	1	0	0	0	0	MISTA
Altomareana	Napoli	ca 1550	0	0	0	0	0	1	0	0	filosofia medicina
Animosi	Bologna	ca 1552	1	0	0	0	0	0	0	1	fisica matematica
Fama	Venezia	1557	1	0	1	0	1	0	0	0	MISTA (editoriale)
Segreti	Napoli	1560	0	0	0	0	0	0	0	0	scientifica
Medica	Foligno	ca 1560	0	0	0	0	0	0	0	0	medicina
Rinaldiana	Napoli	ca 1560	0	1	0	0	1	1	0	0	MISTA
Affidati	Pavia	1562	1	0	1	1	1	0	0	0	MISTA
Oziosi	Bologna	1563	1	0	0	0	1	0	0	0	filosofia scienze naturali
Medica	Pavia	ca 1563	0	0	0	0	0	1	0	0	medicina
Unanimi	Salò	1564	1	0	1	0	0	0	0	0	MISTA
Cornacchiana	Soragna	ca 1568	0	0	0	0	0	1	0	0	scienze fisiche
Solinghi	Pavia	ca 1576	0	0	1	0	0	1	0	0	filosofia naturale
Cosentina	Cosenza	1588	0	0	0	0	0	0	0	0	filosofia scienze
Sregolati	Palermo	ca 1588	0	0	0	0	0	0	0	0	medicina
Medica	Nicosia	ca 1590	0	0	0	0	0	0	0	0	medicina
Eccitati	Brescia	ca 1600	0	0	0	0	0	1	0	0	medicina
Lincei	Roma	1603	1	0	1	1	1	1	0	0	scientifica
Ardenti	Siena	ca 1610	1	0	0	0	0	0	0	0	farmaceutica (speziali)
Erigenda	Bologna	ca 1610	0	0	0	0	0	0	0	0	matematica
Iatrofisici	Palermo	1621	1	1	0	0	1	0	0	0	medicina
Notomia	Palermo	1621	1	1	0	0	0	0	1	0	medicina anatomia
Vespertini	Bologna	1624	1	0	0	0	1	1	0	0	matematica geometria astrologia
Fantastici	Città Cast.	1628	1	0	0	1	0	0	0	0	MISTA (antigalileiana)

(*segue*)

(*segue*)

Nome	Città	Data	Impresa	Indizi	Leggi	Nomi	Stampe	Privata	Pubblica	Istruzione	Attività
Fucina	Messina	1642	1	1	0	1	1	0	1	0	MISTA
Speziali	Bologna	1647	0	0	0	0	1	0	0	0	farmaceutica (speziali)
Investiganti	Napoli	1650	1	0	0	0	0	1	0	0	filosofia scientifica
Massariana	Bologna	ca 1650	0	1	0	0	0	1	0	0	medicina anatomia
Cimento	Firenze	1657	1	0	0	0	1	0	1	0	sperimentale
Fulminati	Torino	ca 1660	1	1	0	0	1	0	0	1	MISTA
Semplici	Roma	ca 1660	0	1	0	0	0	0	1	0	botanica
Filaleti	Venezia	ca 1661	0	0	0	0	0	1	0	0	filosofia naturale botanica
Simposiaci	Roma	1662	1	0	1	0	0	1	0	0	MISTA
Discordanti	Napoli	1666	1	1	0	0	0	0	0	0	filosofia scientifica
Traccia	Bologna	1666	0	0	0	0	1	1	0	0	filosofia scientifica
Borelliana	Palmi	1673	0	0	0	0	0	1	0	0	fisica scienza naturale
Corrara	Venezia	ca 1673	0	0	0	0	0	1	0	0	astronomia
Fisicomatematica	Roma	1677	0	0	1	0	1	1	0	0	scientifica
Cimento	Napoli	1680	0	1	0	0	0	0	0	0	scientifica
Medica	Roma	1681	0	0	0	0	0	1	0	0	medicina
Coraggiosi	Bari	1682	1	1	0	0	0	0	0	0	medicina
Sarottiana	Venezia	1682	0	0	0	0	1	1	0	0	scientifica sperimentale
Spioni	Lecce	1683	1	0	1	0	1	0	0	0	scientifica
Argonauti	Venezia	1684	1	0	0	0	1	0	0	0	cosmografia geografia
Filesotici	Brescia	1686	0	1	0	0	1	0	0	0	scientifica
Aletofili	Verona	1686	1	0	1	0	1	0	0	0	scientifica
Arcidiacono	Bologna	1687	0	1	0	0	0	1	0	0	scientifica
Fisiocritici	Siena	1690	1	0	1	0	0	0	0	0	scientifica
Daviana	Bologna	ca 1690	0	0	0	0	0	1	0	0	scientifica

(*segue*)

(*segue*)

Nome	Città	Data	Impresa	Indizi	Leggi	Nomi	Stampe	Privata	Pubblica	Istruzione	Attività
Inquieti	Bologna	ca 1690	1	0	1	0	0	0	0	0	scientifica
Oscuri	Siena	ca 1692	1	0	1	0	0	0	0	0	aristotelica
Medinacoeli	Napoli	1698	0	0	0	0	0	0	1	0	MISTA
Ingannati	Modena	1699	1	0	0	0	0	1	0	0	medicina
Medicochirurgica	Venezia	1700	0	0	0	0	0	1	0	0	medicina chirurgia
Matematicofisica	Venezia	1704	0	0	0	0	0	0	0	0	matematica fisica
Irrequieti	Salerno	ca 1709	0	1	0	0	0	0	0	0	matematica
Clelia	Milano	ca 1710	1	0	1	0	0	1	0	0	scientifica
Scienze	Bologna	1714	1	0	1	0	0	0	1	0	scientifica

Fonte Riprodotta da Quondam, 1981, pp 32, 36, 37

caratterizzano nettamente in direzione «scientifica» l'attività dei Lincei, anche se indubbiamente, presso i primi Lincei, il momento della progettualità fu assai più intenso di quello delle esecuzioni effettive. Nelle parole del Cesi, il filosofo linceo «non si restringerà alli scritti o alli detti di questo o quello maestro, ma in essercitio universale di contemplatione e pratica cercarà qualsivoglia cognizione che per nostra propria invenzione o per altrui comunicazione ci possa pervenire» (Altieri Biagi 1969, 72).

L'Accademia del Cimento, che è stata giustamente definita come un tipico prodotto della vita di corte (Hall 1973, 119), ebbe una vita breve: dal 1657 al 1667. Il gruppo di professori universitari, ricercatori, artigiani che la costituirono non si formò per associazione spontanea, ma fu aggregato dal principe Leopoldo dei Medici, grande ammiratore di Galilei e fratello del Granduca di Toscana Ferdinando III. Leopoldo partecipava alle sedute dell'Accademia della quale, fra gli altri, furono membri Vincenzo Viviani (1622-1703), Francesco Redi (1626-1698), Nicolò Stenone (1638-1686), Alfonso Borelli (1608-1679), Lorenzo Magalotti (1637-1712) e l'aristotelico Ferdinando Marsili.

Quando Leopoldo fu nominato cardinale, nel 1667, le riunioni ebbero termine, anche a causa dei dissensi fra gli accademici. Proprio in quanto prodotto della vita di corte, il Cimento non ebbe né la struttura né i caratteri di una istituzione scientifica moderna. Era assente ogni statuto ed ogni impegno che riguardasse sia i membri sia il principe. Le riunioni erano informali e non si svolgevano in una sede stabile. Non esistevano né un bilancio né una cassa. I mecenati e protettori intesero l'attività dell'Accademia in funzione decisamente celebrativa (Galluzzi 1981, 790-795). La politica culturale di Leopoldo tendeva certo a sostenere e diffondere le nuove idee scientifiche delle quali Galilei era stato il principale e battagliero esponente. Ma il rigido sperimentalismo adottato dagli accademici tendeva ad escludere conclusioni di carattere teorico. Se nei *Saggi di naturali esperienze* (il volume fu edito solo nel 1667 e tradotto in inglese nel 1684) si dovessero trovare «speculazioni» di carattere teorico «ciò si pigli pur sempre come concetto o senso particolare di Accademici, ma non mai dell'Accademia, nella quale unico istituto è di sperimentare e di narrare» (Altieri Biagi 1969, 626). Questa sorta di volontaria limitazione «sperimentalistica» accomuna quella del Cimento a molte altre accademie. Nel caso specifico essa è legata alla particolare situazione presente in Italia dopo la condanna di Galilei. Ma del galileismo il Cimento fu efficace strumento di apologia e di propaganda (Galluzzi 1981, 802-803).

Un orientamento molto diverso è presente nella napoletana Accademia degli Investiganti (1663-1670). Per Tommaso Cornelio (1614-1684), Leonardo di Capua (1617-1695), Francesco d'Andrea (1624-1698), la

riforma della filosofia e della scienza non appare separabile dal rinnovamento delle attività professionali e della vita civile. Le tradizioni galileiana e cartesiana tendevano a saldarsi, nella prospettiva dei novatori napoletani, con quella che faceva capo a Telesio e al naturalismo rinascimentale. La fine del mondo unitario della filosofia artistotelica veniva avvertita come coincidente con il formarsi di scienze diverse: la matematica, la fisica, gli esperimenti che servono «a spiare le ragioni de' naturali avvenimenti». Il tentativo, compiuto in quegli anni, di legare insieme nuova scienza e riforme sociali non sarà, per la cultura napoletana, privo di conseguenze importanti (Torrini 1981, 847, 853, 876).

La tesi storiografica di una diretta continuità fra i Lincei, il Cimento, gli Investiganti e le grandi accademie europee non appare oggi più sostenibile (Galluzzi, Torrini 1981, 762). La profonda diversità delle situazioni politiche e religiose, l'esistenza di differenti tradizioni filosofiche e di discordanti (a volte divergenti) immagini della scienza dettero luogo a un complicato intreccio (che nei differenti paesi si configurò in modi diversi) fra lo spontaneo associarsi degli scienziati e l'interesse delle autorità politiche per questa loro attività.

4. *Parigi.*

Il mecenatismo fu presente anche in Francia, ma luoghi reali o «ideali» di incontri fra scienziati si formarono anche spontaneamente, come nel caso delle complessa rete di corrispondenza e di rapporti (comprendeva una quarantina di scienziati) tenuta in vita da Marin Mersenne (1588-1648) in un'epoca, è opportuno non dimenticarlo, che precede la circolazione di giornali e periodici e nella quale lo scambio di lettere è il canale privilegiato per ogni commercio intellettuale. Fra il 1615 e il 1662 il *Cabinet des frères Dupuy* fu un centro di discussioni scientifiche. Assai più significativa l'attività che si svolse presso l'Accademia di Montmor, fondata da Habert de Montmor (1634-1679) e che riuniva, presso la casa di quest'ultimo, dopo il 1654, numerosi e insigni personaggi. Tra i frequentatori dell'Accademia, che era molto di moda, sono da ricordare Jacques Rouhault (1620-1673), Blaise Pascal (1623-1662), Gilles de Roberval (1602-1675), stranieri come Christiaan Huygens (1629-1695), Jan Swammerdam (1637-1680), Niccolò Stenone (1638-1687). Pierre Gassendi (1592-1665) presiedette molte sedute e il medico-filosofo Samuel Sorbière (1615-1670) compilò uno statuto nel 1657.

Caratteri molto particolari presentano le 345 pubbliche «conferenze» che si svolsero a Parigi, ogni lunedì pomeriggio, fra il 1633 e il 1642, presso il *Bureau d'Adresse* fondato attorno al 1630 da Theophraste Renaudot, un

medico di Loudun. Presso il *Bureau*, nato come organizzazione commerciale e come sede di prestazioni mediche, si riuniva un pubblico prevalentemente composto di curiosi e di dilettanti, di avvocati, medici e *beaux esprits*. Le discussioni (delle quali resta un preciso resoconto) avvenivano in modi del tutto informali, investivano tutti gli aspetti della cultura e del costume ed erano assai vivaci. Nei dibattiti di argomento filosofico, medico, matematico, astronomico, fisico, domina quasi sempre la tendenza al compromesso fra il nuovo e l'antico. Ma la crescita del sapere — questa la ferma convinzione degli organizzatori ai quali non mancò l'appoggio del Cardinale Richelieu — presuppone una discussione libera entro la quale la verità deve essere sottoposta a critica e può tranquillamente, di fronte alle critiche, essere modificata e abbandonata. Le teorie non vanno considerate, come a parere di molti soci avveniva invece nelle Università, delle «entità invincibili» (Borselli, Poli, Rossi 1983, 13, 32-36).

Nel 1663 Samuel Sorbière si rivolse a Jean-Baptiste Colbert (1619-1683), ministro dell'economia e delle finanze di Luigi XIV, chiedendo che lo Stato contribuisse ad un consolidamento e ad una trasformazione del gruppo di Montmor. La fondazione della *Académie Royale des Sciences* avvenne nel 1666. Fra i primi 16 accademici erano compresi Roberval, Edme Mariotte (1620?-1684), Jean-Baptiste Duhamel (1623-1706). Fra gli stranieri furono chiamati a farne parte Huygens e Olaüs Roemer (1644-1710) dall'Olanda, Giovanni Domenico Cassini (1625-1712) dall'Italia. In un *memorandum* scritto per il ministro Colbert, proprio Huygens prospettava esperimenti sul vuoto, sulla polvere da sparo, sulla forza dei venti e su quella della percossa. La «principale e più utile occupazione del gruppo» gli sembrava quella di «lavorare alla storia naturale secondo il piano tracciato da Bacone». Quella grande storia «composta di esperimenti e di osservazioni è il solo metodo per raggiungere la conoscenza delle cause di tutto ciò che è percepibile in natura». È necessario, concludeva, «cominciare con gli argomenti giudicati più utili, assegnandone contemporaneamente molti a vari membri che ne daranno conto settimanalmente; in tal modo tutto procederà ordinatamente e si otterranno risultati di grande rilievo» (Bertrand 1869, 8-10).

Era nato, con l'*Académie*, un «luogo per la ricerca» direttamente finanziato dallo Stato. I primi accademici ricevevano uno stipendio che variava dalle 6.000 lire (francesi) annue a Cassini alle 1.500/2.000 che ricevevano i francesi. Data la lentezza nei passaggi dall'una all'altra classe non si trattava di una buona sistemazione economica. Il numero degli accademici che, come si è detto, erano inizialmente 16, crebbe a 50 verso la fine del Seicento. Nel 1699 erano saliti a 70 e in quell'anno fu stabilita una distribuzione fortemente gerarchica delle cariche che durò immutata fino alla Rivoluzione.

Il ministro Colbert perseguiva, com'è noto, fini molto precisi: l'ampliamento e l'espansione pianificati dell'industria, del commercio, della navigazione, della tecnica militare. Ma era un politico lungimirante e lasciò agli accademici una autonomia davvero notevole. L'Accademia effettuerà imprese scientificamente rilevanti, come il calcolo del raggio terrestre effettuato da Jean Picard (1620-1682) o il calcolo della distanza Terra-Sole eseguito da Jean Richer (1630-1696). Ma, soprattutto dopo la morte di Colbert, nel 1683, ebbero predominanza notevole finalità pratiche, non sempre particolarmente elevate: come la manutenzione e il perfezionamento delle grandi fontane dei giardini reali. Luigi XIV, dal canto suo, considerava l'Accademia come un abbellimento per la sua corona e chiamava gli Accademici *mes fous* (i miei buffoni). A seguito della revoca dell'Editto di Nantes, nel 1695, l'Accademia perse anche i suoi più prestigiosi membri stranieri, come Huygens e Roemer.

Come ha messo in luce Roger Hahn, «lo spirito della ricerca per la comprensione razionale della natura» non coincideva con le esigenze presenti nella società francese dell'*Ancien Régime*. Molti membri dell'Accademia erano invitati a svolgere la funzione di consulenti governativi, altri erano spinti dalle necessità economiche ad accettare il ruolo di insegnanti, esperti, amministratori. La «professione di scienziato» non apparve, su queste basi, qualcosa di autonomo e di accettabile e l'Accademico del Settecento «fu soggetto a forze centrifughe che lo attiravano in altre direzioni» (Hahn 1975, 163).

5. *Londra.*

Londra ha una precedenza cronologica su Parigi perché il nome *Royal Society* fu usato per la prima volta nel 1661 e il 15 luglio del 1662 la Società fu ufficialmente costituita e approvata dal Re Carlo II. Con una sola eccezione, ne entrarono a far parte i membri del gruppo che si riuniva, fino dal 1645, intorno al *Gresham College* che era stato fondato nel 1597 presso la sua abitazione da un ricco mercante. Al Gresham avevano insegnato i matematici Henry Briggs (1561-1630) e Isaac Barrow (1630-1677), il filosofo naturale Robert Hooke (1635-1703) e l'astronomo Christopher Wren (1632-1723). Nei ricordi del matematico John Wallis (1616-1703), scritti quasi trent'anni più tardi, le riunioni della Società si svolgevano settimanalmente a Londra; i soci si tassavano per le spese relative agli esperimenti; «prescindendo da questioni di teologia e di politica... parlavano della circolazione del sangue, dell'ipotesi copernicana, dei satelliti di Giove, del peso dell'aria, della possibilità o impossibilità del vuoto, dell'esperimento di Torricelli con il mercurio» (Johnson 1971, 350).

La nuova Società era un frutto molto composito. Confluivano in essa la tradizione matematica ed astronomica, quella medico-chimica e quella «tecnologica». Inoltre Robert Boyle, che della nuova istituzione era uno dei membri più autorevoli, era stato fortemente interessato (come risulta da sue lettere del 1646-47) al progetto di un *Invisible College*. Quest'ultimo progetto era legato all'attività svolta in Inghilterra (dopo il 1628) da Samuel Hartlib, tedesco di nascita, che fu uno dei diffusori della «pansofia» di Comenio (Jan Amos Komenski, 1592-1670). Boyle costituirebbe, da questo punto di vista, secondo alcuni studiosi, una sorta di tramite fra la tradizione ermetica e «utopistica», vigorosa in Germania, e la nuova scienza sperimentale (Rattansi, in Mathias, 1972, 1-32).

Di «reale» la società aveva solo il nome. Non riceveva finanziamenti dalla corona. Viveva della autotassazione dei suoi membri che anche per questa ragione saranno in seguito molto numerosi. Gli stipendi del segretario e del curatore degli esperimenti, che era Robert Hooke (il quale è stato per questa ragione definito «il primo scienziato professionale della storia») erano molto scarsi. Il compito inizialmente assunto dalla Società fu quello, tipicamente baconiano, della compilazione di «storie»: della meccanica, astronomia, professioni, agricoltura, navigazione, fabbricazione dei panni, tintoria ecc. L'ambizione a svolgere vere e proprie ricerche collettive fu presto abbandonata ma, a differenza di quanto avveniva in molti altri gruppi dello stesso genere, «quando veniva letto un lavoro o discussa un'idea, raramente l'argomento era lasciato cadere senza che qualche esperimento fosse stato svolto davanti all'assemblea riunita» (Hall 1973, 129). Molta della letteratura scientifica recente passava inoltre al vaglio della Società e gli esperimenti in essa descritti venivano ripetuti. Hooke e Boyle erano particolarmente attivi e il segretario Henry Oldenburg (1615?-1677), un tedesco di nascita che si era stabilito in Inghilterra nel 1653, era al centro di una rete molto estesa di contatti personali ed epistolari.

A differenza dell'*Académie des Sciences*, la *Royal Society* era del tutto indipendente dallo Stato: godeva del privilegio di poter usare il servizio postale diplomatico per i suoi scambi con l'estero e aveva soltanto l'impegno della conduzione dell'Osservatorio Reale di Greenwich (fondato nel 1675). Si era creato uno strumento «atto a stabilire un commercio intellettuale costante fra tutti i paesi civili» e la Società intendeva configurarsi come «la banca universale e il libero porto del mondo». Ad essa, scriveva ancora Thomas Sprat nel 1667, sono stati liberamente ammessi uomini di differente religione, nazionalità, professione. Essi dichiarano di non voler fondare una filosofia inglese, scozzese, cattolica o protestante, ma una filosofia del genere umano» (Sprat 1966, 63).

6. *Berlino.*

Relativamente ai paesi di lingua tedesca non si può certo parlare di luogo di ricerca scientifica a proposito della *Leopoldinisch-Carolinische Deutsche Akademie der Naturforscher* (Accademia Tedesca Leopoldino-Carolina di Scienze Naturali) che era stata fondata nel 1652 a Schweienfurt da quattro medici con il nome (che si richiamava a quello impiegato dal Porta nel Cinquecento) di *Academia Naturae Curiosorum* (Kraft 1981, 448). Alla fine del Seicento la Germania era un mosaico di Stati, alcuni cattolici, altri luterani, di dimensioni molto diverse: dalla Prussia-Brandenburgo fino a ducati, città e villaggi autonomi. Le Università erano state riorganizzate secondo il modello elaborato da un grande esponente della Riforma, Philipp Schwarzerd detto Melantone (1497-1560): una Facoltà di Arti e Filosofia dalla quale era necessario passare per iscriversi alle Facoltà di Legge, Teologia o Medicina. Malgrado la diffusa povertà e le molte guerre, la Germania era un paese istruito. Già nel primo decennio del Settecento, in Prussia, l'educazione era obbligatoria per tutti i bambini (Farrar 1979, 214-217).

Anche il grande filosofo, matematico e storico Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) teneva in una considerazione molto scarsa le Università. Le considerava istituzioni antiquate, estranee al mondo, ormai quasi del tutto sclerotizzate. Nei suoi progetti di una grande Accademia, Leibniz si preoccupava del difficile problema di una copertura finanziaria. Si richiamava al modello francese, ma escludeva ogni controllo statale e teorizzava la necessità di un'ampia autonomia. Pensava anche che fra i compiti di un'Accademia ci fosse quello di costruire una grande enciclopedia del sapere (Hammerstein 1981, 413-418). Le effettive realizzazioni non corrisposero affatto ai sogni iniziali e Leibniz legò il suo progetto di un'Accademia a quegli obiettivi che Bacone aveva considerato non i più nobili: l'esaltazione di una nazione nei confronti di tutte le altre (Hall 1986, 262). Attraverso la creazione di un'Accademia, Leibniz si proponeva un incremento della nazione e della lingua tedesche, un approfondimento delle scienze, l'espansione dell'industria e del commercio, la propagazione del Cristianesimo Universale mediante la scienza.

La *Societas Regia Scientiarum* fu istituita, sulla base del progetto leibniziano, l'11 luglio del 1700 e fu patrocinata dall'Elettore (poi Re) di Brandenburgo-Prussia, Federico I. L'Accademia fu definitivamente riconosciuta il 19 gennaio del 1711. Venne riorganizzata da Federico II che, su suggerimento di Voltaire, chiamò a dirigerla (nel 1746) Pierre-Louis Moreau de Maupertuis (1698-1759) facendole assumere il nome di *Königliche Preussische Akademie der Wissenschaften* (Accademia Reale

Prussiana delle Scienze). La presidenza di Maupertuis segnò l'apogeo dell'influenza francese sulla cultura tedesca: il francese era la lingua ufficiale dell'Accademia e, fino al 1830, le *Abhandlungen* conserveranno il titolo di *Mémoires*. L'Accademia di Berlino disponeva di un teatro anatomico, di un orto botanico, di collezioni di storia naturale e di raccolte di strumenti. Ne fecero parte Jean Bernoulli (1667-1748), Leonhard Euler (1707-1783), Joseph-Louis Lagrange (1736-1813). Nel 1740 Federico II scrive a Voltaire: «Ho già acquisito Wolf, Maupertuis e Algarotti. Attendo le risposte di Vaucanson, s'Gravesande, Eulero» (Daumas 1957, 117).

7. *Bologna.*

Molte delle società scientifiche sorte in Europa mostrano due fondamentali caratteristiche: 1) a partire da gruppi aventi interessi più vasti si vanno consolidando organizzazioni specificamente scientifiche; 2) all'interno di tali organizzazioni gli «sperimentalisti» acquisiscono una posizione preponderante. Nell'ultimo quarto del secolo, in parte per l'influenza esercitata dalla filosofia cartesiana e dal neocartesianesimo matematico e sperimentale (rappresentato da Huygens, Leibniz e Malebranche), sono presenti, nelle società scientifiche, tendenze verso la professionalizzazione: quelle società «servono da centro di discussione più di *risultati* che di *idee*» (Hall 1986, 260-261).

Proprio in questa direzione sembrano muoversi le *Costituzioni dell'Istituto delle Scienze eretto in Bologna*. Nell'Istituto non dovevano svolgersi lezioni o tenersi discorsi scientifici «dovendo tutti gli esercizi versare principalmente sulla pratica delle osservazioni, esperimenti ed altre cose di simil natura» (Tega 1986, 19). L'Accademia delle Scienze di Bologna rappresenta, nella situazione italiana, una novità. A Bologna avevano operato (fra il 1626 e il 1647) Bonaventura Cavalieri e (fra il 1666 e il 1691) Marcello Malpighi. Nel 1655 era stata pubblicata la prima edizione delle *Opere* di Galilei (che, a causa della censura, non comprendeva né il *Dialogo* né la *Lettera a Cristina di Lorena*); a Bologna era stata attiva (dal 1690 circa) la Accademia degli Inquieti i cui membri si interessavano di astronomia, calcolo infinitesimale, scienze della vita. Luigi Ferdinando Marsili (1658-1730), che aveva messo a disposizione degli Inquieti il suo palazzo e le sue collezioni, tentò invano una riforma dell'Università pubblicando, nel 1709, un efficace *Parallelo dell'Università di Bologna con l'altre di là dei monti*. Riuscì invece a dar vita, ispirandosi al modello parigino, all'Accademia che fu inaugurata il 13 marzo 1714. Un *Breve* di Clemente XI, nel 1715, ratificava le leggi e ne definiva la dotazione. L'Accademia conobbe uno sviluppo davvero notevole quando fu eletto al soglio pontificio, col nome di Benedetto XIV, il

cardinale Prospero Lambertini che era stato arcivescovo di Bologna fra il 1731 e il 1740.

Alla fine del pontificato del Lambertini, l'Istituto bolognese disponeva di una serie di laboratori, officine, musei di straordinaria ampiezza che lo collocavano, in molti settori, ad un livello europeo. I *Commentarii* dell'Accademia bolognese ebbero diffusione europea. E ciò accadde anche per le *Memorie* della romana Società Italiana delle Scienze, detta Accademia dei Quaranta per il numero fisso dei suoi soci, che fu fondata nel 1782 e reclutò i suoi membri nell'intera penisola.

8. *Altre Società, Accademie, una Università.*

Nel 1710 si era aperta l'Accademia di Svezia, nel 1724, a Pietroburgo, la *Academia Scientiarum Imperialis Petropolitana*, sempre nel 1724 la Accademia Danese. Ogni stato europeo — Irlanda, Belgio, Portogallo — dà vita ad una sua Accademia. Nel corso del Settecento, in Scozia, la *Select Society* e la *Philosophical Society* di Edimburgo dettero espressione alla straordinaria fioritura dell'Illuminismo scozzese che ha al suo centro la grande opera filosofica di David Hume (1711-1776) e, durante la seconda metà del secolo (per quanto riguarda le scienze), l'opera del chimico Joseph Black (1728-1799) (Christie 1979).

Fino dal 1683, a Boston, esisteva una *Boston Philosophical Society*. Nel 1734, su impulso di Benjamin Franklin (1706-1790), che ne fu presidente rieletto ogni anno fino alla morte, prendeva vita, a Filadelfia, la *American Philosophical Society held at Philadelphia for promoting useful knowledge*. Nel 1780, sulla base di un progetto lungamente perseguito da John Adams (1735-1826), si apriva a Boston la *American Academy of Arts and Sciences*.

Si è fatto cenno, all'inizio, ai rapporti fra cultura delle Università e cultura delle Accademie. Proprio in Germania, un paese che aveva costruito le sue istituzioni scientifiche moderne sulla base di una spregiudicata «importazione» di modelli francesi, si verificò, nel mondo universitario, nel corso del Settecento, un fatto nuovo e di rilevante importanza. Gerlach Adolph von Münchausen (1688-1770), ministro dello Stato di Hannover, dette vita, a Gottinga (nel 1737), ad una Università organizzata secondo modelli in tutto non tradizionali. I professori vi erano attirati da numerose condizioni assai vantaggiose. Ad essi era affidato il compito non solo di insegnare, ma di elaborare conoscenze: dovevano non solo trasmettere il sapere, ma *svolgere ricerca* (Daumas 1957, 114). Era, nelle Università, un fatto nuovo che non sarà, per l'intera cultura scientifica europea, privo di conseguenze.

9. *La diffusione della scienza.*

Non è certo possibile nemmeno tentare di enumerare i moltissimi giornali, gazzette, riviste, collezioni e pubblicazioni periodiche nelle quali trovò espressione la impressionante mole di lavoro che si svolgeva nelle Accademie e nelle Società scientifiche europee. Converrà tuttavia fare un'eccezione per tre casi. Nel 1665 Henry Oldenburg fondò la prima rivista europea di carattere strettamente scientifico, le «Philosophical Transactions» che si fregiavano dell'*imprimatur* della *Royal Society* e ne utilizzavano la corrispondenza. Nello stesso anno era uscito, a Parigi, il «Journal des Savants» che trattava, oltre che di matematica e filosofia naturale, di storia, teologia, letteratura. Nel 1684, infine, iniziò a Lipsia la pubblicazione degli «Acta eruditorum» ove erano recensiti libri di ogni ramo del sapere: gli Atti, pubblicati in latino, potevano essere letti da tutti i dotti e scienziati europei.

I molti periodici scientifici pubblicati in Europa ebbero, nel loro complesso, una circolazione molto ampia. Essa rispondeva da un lato ad una sempre più accentuata esigenza di interscambio scientifico e dall'altro ad un interesse sempre più ampio e diffuso per la scienza e, in specie, per la scienza sperimentale. «La fisica — scriveva Petrus Musschenbroek (1692-1761) nel 1736 — non è mai stata tanto coltivata come oggi. Essa non è più, come un tempo, l'appannaggio di un piccolo numero di filosofi, ma fiorisce ed è in voga presso tutti i *savants*. Anche il mercante fa di essa una parte delle sue occupazioni e l'artigiano, che ne sente parlare tutti i giorni, comincia a prendervi parte» (Daumas 1957, 111). «I fogli periodici — scriverà dal canto suo Cesare Beccaria (1738-1794) facendo riferimento alla seconda annata della rivista milanese «Il Caffè» (pubblicata fra il 1764 e il 1766) — devono essere una miniera di tentativi e di suggerimenti. L'agricoltura, le arti, il commercio, la politica, sono quelle cognizioni che ogni cittadino non manuale dovrebbe meno ignorare...La fisica e la storia naturale sono una miniera inesausta di ricerche e di avvantaggiosissime scoperte, ed hanno una connessione più generale e più estesa colle scienze che paiono più remote da quelle» (Casini 1973, 518).

«Un nuovo universo — aveva affermato Voltaire nel 1737, facendo riferimento a Galilei, Keplero, Harvey, Newton — è stato scoperto dai filosofi dell'ultimo secolo» (ed. Moland, XXII, 438). Quel nuovo universo non interessava soltanto gli scienziati di professione e i membri delle Società e Accademie scientifiche. Le molte enciclopedie del Settecento e soprattutto le molte opere di divulgazione scientifica, scritte in modo estremamente gradevole e spesso rivolte alle dame, sono l'indice del clima e degli orientamenti che caratterizzano l'Età dei Lumi. Fra le opere maggiori e di maggior successo vanno almeno ricordati: gli *Entretiens sur la pluralité des*

mondes (1686) di Bernard de Fontenelle (1657-1757), che ebbero trenta edizioni durante la vita dell'autore; la *Venus physique* (1754) di Maupertuis (1698-1759), le *Lettres à une princesse d'Allemagne* (1768-1772) di Leonhard Euler (1710-1783); gli *Eléments de la philosophie de Newton* (1737, rielaborati nel 1741) di Voltaire (1694-1778); il *Newtonianesimo per le dame* (1737) di Francesco Algarotti (1712-1764). Uno dei divulgatori più noti fu, in Francia, l'abate Jean-Antoine Nollet (1700-1770). Le sue lezioni di fisica, nel corso delle quali venivano fra l'altro ripetuti spettacolari esperimenti sull'elettricità, ebbero, in provincia e a Parigi, uno strepitoso successo presso un pubblico molto ampio.

Anche il pubblico della *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des Sciences, des Arts et des Métiers* (il primo volume uscì nel 1751 e l'ultimo nel 1765), e così pure il pubblico della *Encyclopédie méthodique* che esce fra il 1782 e il 1825, incarnava le nuove richieste che erano venute maturando nella società francese. Il gigantesco lavoro svolto per l'*Encyclopédie* da Denis Diderot (1713-1784) affondava le sue radici in progetti precedenti e in precedenti incontri fra artigiani e *amateurs* della scienza (Hahn 1981), ma portava a compimento una grande sintesi. In essa si tentava una unificazione dei risultati più nuovi della scienza e delle conquiste più significative della tecnologia. Al di là dei numerosi, inevitabili compromessi con il potere politico, lo sfondo era quello, laico, critico e antitradizionalista, della nuova borghesia. Nella voce *Art*, Diderot rilevava gli effetti negativi che erano derivati alla cultura e alla civiltà dalla tradizionale contrapposizione fra le arti liberali e le arti meccaniche, fra le occupazioni degli uomini liberi e il lavoro riservato ai servi. Questa opposizione, affermava, ha rafforzato il pregiudizio che «il volgersi agli oggetti sensibili e materiali costituisca una deroga alla dignità dello spirito umano». Questo pregiudizio «ha riempito le città di ragionatori presuntuosi e di contemplatori inutili e le campagne di piccoli tiranni ignoranti, oziosi e disdegnosi» (Rossi 1971, 136).

10. *La scienza e la Rivoluzione in Francia.*

Antoine-François Fourcroy (1755-1809), amico e collaboratore di Lavoisier, fu presidente del Club dei Giacobini; il matematico e geometra Gaspard Monge (1746-1818), che diventerà ministro della marina e delle colonie durante la Convenzione, ne fu segretario e vicepresidente; il matematico Lazare Carnot (1753-1823) fece parte, durante gli anni del Terrore, dell'onnipotente Comitato di salute pubblica. Ma i rapporti dei Giacobini con la scienza furono improntati a forte ostilità. Richiamandosi alla filosofia di Jean-Jacques Rousseau, essi consideravano i membri delle istituzioni scientifiche fondate dai Re di Francia solo dei cortigiani privilegiati. La

scienza, ai loro occhi, era una forma nuova di aristocrazia e l'eccellenza del genio scientifico una sorta di crimine contro gli ideali dell'eguaglianza; il tecnicismo del linguaggio scientifico era un velo ingiustificato interposto fra il popolo e la verità. L'immagine giacobina della scienza identificava dunque quest'ultima con una subcultura aristocratica che continuava ingiustamente ad esistere in una società democratica ed egualitaria. I Giacobini intendevano inculcare nei cittadini le grandi virtù degli Spartani; facevano coincidere morale e politica; guardavano con sospetto ad ogni separazione e distinzione sociale, anche se fondata sul merito e sull'intelligenza (Gillispie 1962, 91).

L'attacco più devastante contro il sistema delle accademie (e contro quella che si chiamerebbe oggi «la meritocrazia»), venne dal roussoiano Bernardin de Saint-Pierre: se è vero che le scienze e le lettere contribuiscono alla prosperità di una nazione, «allora è più giusto che i membri delle accademie vengano eletti dalla nazione, così come si fa con le altre assemblee; quando sono le accademie ad eleggere i loro propri membri, allora esse diventano delle aristocrazie» (Hahn 1971, 183). Il presidente del tribunale rivoluzionario che condannò a morte il grande Antoine Lavoisier (1743-1794) proclamò che «la Repubblica non aveva bisogno di scienziati». E c'erano anche stati scienziati falliti, diventati personaggi politici molto potenti, come Jean-Paul Marat (1743-1793), che avevano sfogato il loro astio contro Lavoisier qualificandolo un plagiatore e un ciarlatano (Fayet 1960, 473; Feuer 1969, 253; Gillispie 1983, 353-398).

Nel progetto per la riforma della pubblica istruzione che fu presentato all'Assemblea Legislativa dal matematico, filosofo e uomo politico Marie-Jean-Antoine Condorcet (1743-1794) era saldamente presente l'eredità dei *philosophes* e in esso venivano anche energicamente difesi i diritti dell'«elitismo scientifico». «Tutti gli errori di governo e tutti gli errori sociali — scriveva — si fondano su errori filosofici, i quali, a loro volta, derivano da errori nelle scienze». Ogni e qualsiasi tipo di autorità «è un nemico naturale dell'istruzione» e chi impiega il suo tempo nella ricerca della verità «diviene naturalmente odioso a coloro che aspirano all'autorità» (Feuer 1969, 256). Il progetto di Condorcet fu respinto da Robespierre che contrappose all'eredità dei *philosophes* quella di Rousseau: «Se i difensori della libertà sono accademici, amici di d'Alembert, non ho nulla da replicare, salvo che le reputazioni, nel nuovo regime, non possono essere fondate su quelle del vecchio regime. Se d'Alembert e i suoi amici ridicolizzarono il clero, essi favorirono anche i re e il potere... Tutti quei grandi filosofi perseguitarono deliberatamente la virtù, il genio e la libertà di Jean-Jacques, il solo fra i grandi uomini di quell'età che sia meritevole di una pubblica apoteosi» (Hahn 1971, 212-213). Gli sforzi combinati del risentimento degli artigiani

contro i teorici e degli ideologi dell'antielitismo ebbero la meglio sugli argomenti che si richiamavano all'eredità dei *philosophes*. L'8 agosto del 1793, durante la fase ascendente del Terrore, la Convenzione abolì le accademie scientifiche come incompatibili con la Repubblica (Hahn 1971, 225-226).

In qualche modo connessa al «romanticismo» roussoiano e alla voga dell'«amore per la natura» fu la trasformazione, effettuata dalla Convenzione, dell'antico *Jardın du Roi* nel moderno *Muséum d'histoire naturelle* che venne dotato di dodici cattedre di scienze biologiche, nel quale insegnarono Saint-Hilaire, Cuvier e Lamarck e che sarà alla base del grande sviluppo dell'anatomia e della fisiologia francesi nell'Ottocento (Gillispie 1962, 90). Fu questa l'unica istituzione scientifica creata dai Giacobini. Solo dopo il Termidoro e la caduta di Robespierre fu istituita una serie di grandi strutture scientifiche ed educative. L'*Institut de France*, che ne era al culmine, fu fondato nel 1795 e, nello stesso anno, l'*Ecole Normale* e l'*Ecole polytechnique*. Nel 1794 era stato istituito il *Conservatoıre national des Arts et des Métiers*. Lo status sociale degli insegnanti e degli studenti subì modificazioni profonde. Sylvestre-François Lacroix (1765-1843), che aveva insegnato matematica ai cadetti di marina durante l'*ancien régime*, mise a confronto (nel 1805) le umiliazioni e gli insulti che aveva ricevuto dagli ufficiali e dagli studenti aristocratici con il prestigio di cui godeva all'*Ecole politechnique* ove gli studenti, mediante un sistema di borse di studio, provenivano da tutte le classi sociali (Crosland 1979, 173). Ma soprattutto, e questo è il dato più importante, cambiò fortemente la situazione degli scienziati. La ricerca si configurò, nelle nuove strutture educative e scientifiche, come una professione o come un impiego a tempo pieno e retribuito al quale si accede dopo un periodo di formazione (Crosland 1979, 164). Agli inizi del Settecento era del tutto normale che chi si occupava di scienza svolgesse un lavoro privo di ogni rapporto con i suoi interessi scientifici. La carica di appaltatore delle imposte serviva a Lavoisier per pagarsi le spese di laboratorio e Pierre-Simon Laplace (1749-1827) aveva ricoperto, durante l'*ancien régime*, l'incarico di ispettore di artiglieria. Tutti i membri dell'*Institut* ricevevano invece uno stipendio che non poteva essere rifiutato. Come aveva affermato Fourcroy «bisogna che professori e assistenti facciano il loro dovere senza che nessun altro impegno privato li distragga dai loro compiti» (Crosland 1979, 171). L'accettazione di uno stipendio implicava l'obbligo di insegnare la scienza, svolgere ricerca o fare entrambe le cose (*Ibid.*, 169-174).

All'*Ecole polytechnique* (cfr. anche vol. II, cap. I) si entrava per concorso. Il curriculum aveva al centro l'insegnamento della matematica, seguito da quelli di fisica e di chimica. Agli scopi più strettamente professionali provvedevano, al termine del ciclo di studi e dopo un esame

finale, le *écoles de application* o di servizio pubblico dedicate a ponti e strade, miniere, geografia, genio militare, artiglieria, ingegneria navale. Le facoltà scientifiche universitarie istituite fra il 1808 e il 1812 a Parigi, Aix, Strasburgo, Tolosa e in altre città ebbero minor prestigio e minori attrezzature di quelle presenti nelle *Écoles*. Il lavoro svolto dalla Commissione per l'unificazione dei pesi e delle misure (il congresso si svolse nel 1798) aveva contribuito al prestigio della Francia ed era stato in questo utilizzato da Talleyrand.

Una spregiudicata utilizzazione della scienza e degli scienziati ai fini di una politica di prestigio e di potenza fu consapevolmente perseguita da Napoleone. Durante la campagna d'Italia del 1796 tre illustri accademici furono utilizzati per selezionare il materiale scientifico e artistico degno di essere trasferito a Parigi. Due anni più tardi molti scienziati presero parte alla spedizione in Egitto. La *Kulturpolitik* di Buonaparte offriva agli scienziati, in cambio dei servizi resi al governo, mezzi per l'esercizio della loro professione ed onorificenze politiche. Il chimico Claude Berthollet (1748-1822), il naturalista Louis Daubenton (1716-1800), il chimico Antoine-François Fourcroy (1755-1809), i matematici Joseph-Louis Lagrange (1736-1813) e Gaspard Monge (1746-1818) furono nominati senatori. Il patrocinio offerto alla scienza fu oltremodo generoso. Via via che il regime napoleonico evolveva verso forme di autocrazia, la relativa indipendenza personale e istituzionale, che era stata una delle tradizioni delle accademie dell'*ancien régime*, venne progressivamente ridotta. Quando, nel 1803, Napoleone impose una ristrutturazione dell'Istituto, se ne servì come di una copertura per ciò che veramente lo interessava: la eliminazione della Classe di scienze morali e politiche ove si annidavano gli *idéologues*, che erano i suoi critici più aspri e irriducibili. Quando l'Imperatore scrisse nel 1807 che l'Istituto esisteva per realizzare i suoi desideri, non fece che descrivere una situazione di fatto (Hahn 1971, 310-312).

Come era risultato del tutto chiaro a Condorcet (*Oeuvres*, VII, 423), la scienza, con la Rivoluzione, si era trasformata in una sorta di mestiere (*une sorte d'état*). Non era più l'occupazione alla quale si dedicavano per diletto persone che non avevano problemi di sopravvivenza o che traevano da altre attività i loro mezzi di sostentamento: era un'attività pubblicamente riconosciuta che attirava giovani di talento. Quando Georges Cuvier (1769-1832) indirizzò a Napoleone il suo «Rapporto sui progressi delle scienze naturali dopo il 1789 e sul loro stato attuale», sembrò a molti che le aspirazioni degli enciclopedisti si fossero realizzate in una politica nazionale (Feuer 1961, 263).

L'antica Accademia, da un club privato di entusiasti della scienza, si era trasformata in una delle più prestigiose voci della scienza sul continente. I

membri dell'Istituto indossavano uniformi e appendevano su di esse le loro medaglie. Fino al 1930, quando verrà istituito il *Centre Nationale de la Recherche scientifique* e i vari comitati ministeriali per la ricerca scientifica, l'*Institut* sarà l'unica voce, insieme molto conservatrice e molto autorevole, degli scienziati francesi (Hahn 1971, 312, 315). La linea che separava la scienza dalla politica si era comunque fatta molto più sottile.

11. *Scienza francese e scienza inglese.*

Nel corso del secolo XVIII l'*Académie des sciences* aveva eclissato le altre accademie e società scientifiche. L'Inghilterra mantenne la sua indipendenza intellettuale scientifica, ma la Francia era diventata il centro mondiale dell'attività scientifica e il francese la lingua franca parlata e scritta da molti scienziati e intellettuali europei. Gli scienziati e gli studiosi di molti paesi europei si recavano a Parigi per proseguire i loro studi (Ben David 1975, 131, 141). Questa egemonia francese andrà declinando fra il 1830 e il 1840 (cfr. l'*Introduzione* al vol. II).

Società e Accademie scientifiche giocarono un ruolo decisivo nel processo di istituzionalizzazione della scienza (cfr. l'*Introduzione* al vol. II). Converrà tuttavia concludere la presente introduzione muovendosi non sul piano delle generalizzazioni, ma su quello del rilievo delle differenze. Thomas Kuhn si è posto, relativamente a queste ultime, una domanda importante: le differenze fra le attività svolte nel Settecento dalla *Académie des Sciences* e quelle praticate nella *Royal Society* non sono molto maggiori di quelle che distinguono le attività dell'Accademia del Cimento rispetto a quelle del Gruppo di Montmor? (Kuhn 1985, 67). In realtà — questa la tesi di Kuhn — la tradizione delle scienze «classiche» o «matematiche» (astronomia, «armonia», statica, ottica) e la tradizione delle scienze «baconiane» o «sperimentali» (chimica, studio del calore, dell'elettricità, del magnetismo) rimasero tradizioni distinte e (fatta eccezione per la chimica che trovò una composita base istituzionale dalla fine del Seicento) il centro delle scienze «matematiche» fu l'Europa (in specie la Francia), il centro delle scienze «baconiane» l'Inghilterra. Newton partecipa chiaramente ad entrambe le tradizioni, ma nella tradizione che si richiama a Newton sono distinguibili due filoni: quello che si richiama ai *Principia* e quello che fa capo all'*Ottica*. Newton è l'ultimo matematico inglese, prima della metà dell'Ottocento, che possa competere con i grandi matematici francesi (Bernoulli, Eulero, Lagrange, Laplace e Gauss). Sperimentatori del continente che possano gareggiare con la fama di Boyle, Hooke, Black e Priestley sono difficili da trovare prima degli anni attorno al 1780. Durante il secolo XVIII (con l'eccezione parziale di Huygens e Mariotte) nessuno, dopo Newton,

partecipò in modo significativo *ad entrambe* le tradizioni. Ciò non fu senza influenza sullo sviluppo delle istituzioni scientifiche e delle carriere professionali (Kuhn 1985, 55, 66, 58).

Ancora con l'eccezione dei chimici (che lavoravano nelle industrie, in alcune scuole mediche e in farmacia durante il secolo XVIII), coloro che praticavano le scienze baconiane furono in genere dei dilettanti. Prima della seconda metà dell'Ottocento non vi furono, nelle Università, posti per le altre scienze sperimentali nonostante fosse fortemente aumentato il numero delle cattedre dedicate alle scienze classiche. Alcuni di coloro che praticavano le scienze «baconiane» trovarono posto nelle Accademie del continente, ma erano spesso membri di seconda categoria. Gli esempi portati a questo proposito da Kuhn sono numerosi e molto persuasivi. Anche dal punto di vista dell'organizzazione formale, una sezione di *physique expérimentale* fu introdotta nell'Accademia di Parigi solo nel 1785 e fu quindi aggregata alla sezione di matematica (insieme alla geometria, l'astronomia, la meccanica) piuttosto che nella divisione delle più manuali *sciences physiques* (anatomia, chimica e metallurgia, botanica e agricoltura, storia naturale e mineralogia: Kuhn 1985, 58-59).

La *Royal Society* fu invece abbondantemente affollata di dilettanti. Nella tradizione inglese dilettantismo e sperimentalismo, associati ad una forte tensione utilitaristica, ad un'alta stima per il lavoro e le attività manipolative, ad uno spiccato interesse per l'industria non è presente solo a Londra. Per convincersene basta por mente alla straordinaria attività di quel gruppo di «provinciali» inglesi che iniziarono a riunirsi intorno al 1765 in una struttura informale che prese solo più tardi il nome di *Lunar Society of Birmingham*. Fra essi erano James Watt (1736-1819), Erasmus Darwin (1731-1802), Joseph Priestley (1733-1804). Come in un microcosmo si rispecchiano per un quarto di secolo, nelle vicende di quella società, i problemi scientifici, tecnologici, sociali, politici, ideologici che accompagnano il passaggio dell'Inghilterra da società rurale ed agricola a società urbana e industriale (Schofield 1963; Musson 1972).

Le Società e le Accademie scientifiche, si è detto all'inizio, tendono a costituirsi, all'interno della società, come «territori separati» all'interno dei quali vigono regole specifiche. I rapporti con il resto della società possono essere di ostilità (latente o dichiarata) o di collaborazione. Ma come accade per tutti i corpi sociali separati, si manifestano, fra gli accademici, spirito di corpo, dosi notevoli di conservatorismo culturale, una forte litigiosità, una notevole disposizione al pettegolezzo. Nelle accademie più formali, burocratizzate e regolamentate, questi aspetti diventano più evidenti. Configurandosi come una élite, i membri di queste accademie subiscono anche, con notevole frequenza, i numerosi attacchi degli esclusi, dei fautori di scienze alternative,

degli avversari dell'elitismo scientifico, nonché dei ciarlatani, semiciarlatani, cultori di pseudoscienze, paranoici di vario livello che sono numerosissimi in ogni tempo. Il 13 marzo del 1775 d'Alembert fece votare una delibera all'*Académie des Sciences*: «È stato chiesto se dobbiamo continuare a ricevere ed esaminare memorie su questo argomento e su pochi altri il cui esame richiede tanto tempo ed è infruttoso. L'Accademia voti: che di qui in avanti non accetterà né esaminerà memorie concernenti la quadratura del cerchio, la trisezione dell'angolo, la duplicazione del cubo, il moto perpetuo e che questa delibera venga resa pubblica» (Hahn 1971, 145).

Ma non era, quello della difesa della serietà dello specialismo, il problema vero delle Accademie. Quando, nel corso dell'Ottocento, gli scienziati raggiungeranno un loro status professionale e le Università diventeranno il luogo primario della ricerca, esse verranno relegate in una posizione del tutto marginale.

BIBLIOGRAFIA

Accademie scientifiche del Seicento Professioni borghesi, in «Quaderni Storici», XVI, 1981, 48.

M.L. ALTIERI BIAGI, *Scienziati italiani del Seicento*, Milano-Napoli, Ricciardi, 1969.

G. ARNALDI (a cura di), *Le origini dell'Università*, Bologna, Il Mulino, 1974.

U. BALDINI e L. BESANA, *Organizzazione e funzioni delle Accademie*, in *Storia d'Italia. Annali III*, Torino, Einaudi, 1980, pp. 1307-1333.

B. BARBER e W. HIRSCH (a cura di), *The sociology of science*, New York, The Free Press of Glencoe, 1962.

J. BEN DAVID, *Scienza e società*, Bologna, Il Mulino, 1975.

J. BERTRAND, *L'Académie Royale des Sciences de 1666 à 1793*, Paris, 1869.

M. BOAS HALL, *Renaissance science and professionalisation*, in «Annali dell'Istituto e Museo di storia della scienza di Firenze», VII, 1982, pp. 53-64.

L. BOEHM e E. RAIMONDI (a cura di), *Università, accademie e società scientifiche in Italia e in Germania dal Cinquecento al Settecento*, Bologna, Il Mulino, 1981.

L. BORSELLI, C. POLI, PAOLO ROSSI, *Una libera comunità di dilettanti nella Parigi del Seicento*, in *Cultura dotta e cultura popolare nel Seicento*, Milano, Angeli, 1983.

P. CASINI, *Introduzione all'Illuminismo*, Bari, Laterza, 1973.

M. CAVAZZA, *Verso la fondazione dell'Istituto delle Scienze filosofia «libera», baconismo, religione a Bologna*, in *Sull'identità del pensiero moderno*, Firenze, La Nuova Italia, 1979, pp. 47-146.

J.R.R. CHRISTIE, *Ascesa e declino della scienza scozzese*, in CROSLAND 1979, pp. 131-150.

I.V. COMPARATO, *Società civile e società letteraria nel primo Seicento l'Accademia degli Oziosi*, in «Quaderni Storici», VIII, 1973, 23.

M.P. CROSLAND (a cura di), *L'affermazione della scienza moderna in Europa*, Bologna, Il Mulino, 1979.

ID., *Sviluppo di una professione scientifica in Francia*, in CROSLAND 1979, pp. 165-189.

U. DALLARI, *I rotuli dei lettori leggisti e artisti dello studio bolognese dal 1384 al 1799*, Bologna, 1888-1924.

M. DAUMAS, *Esquisse d'une histoire de la vie scientifique*, in *Encyclopédie de la Pléiade Histoire de la science*, Paris, Gallimard, 1957.

P. DIBON, *La philosophie néerlandaise au siècle d'or I - L'enseignement philosophique dans les Universités à l'époque pré-cartésienne, 1575-1650*, Paris, 1954.
W.V. FARRAR, *Scienza e Università in Germania 1790-1850*, in CROSLAND, 1979, pp. 213-232.
J. FAYET, *La Révolution Française et la science*, Paris, 1960.
L.S. FEUER, *L'intellettuale scientifico origini psicologiche e sociologiche della scienza moderna*, Bologna, Zanichelli, 1969.
R. FOX, *Scientific enterprise and the patronage of research in France 1800-1870*, in «Minerva», XI, 1973, pp. 442-473
P. GALLUZZI, *L'Accademia del Cimento*, in *Accademie scientifiche*, 1981, pp. 788-844.
E. GARIN, *L'educazione in Europa 1400-1600*, Bari, Laterza, 1976.
CH. C. GILLISPIE, *Science in the French revolution*, in BARBER e HIRSCH 1962, pp. 89-97.
ID., *Il criterio dell'oggettività*, Bologna, Il Mulino, 1981.
ID., *Scienza e potere in Francia alla fine dell'ancien régime*, Bologna, Il Mulino, 1983.
C. GIUNTINI, *Scienza e società in Inghilterra dai Puritani a Newton*, Torino, Loescher, 1979.
W.D. HACKMANN, *Lo sviluppo della scienza nei Paesi Bassi fra Seicento e primo Settecento*, in CROSLAND 1979, pp. 107-130.
R. HAHN, *The anatomy of a scientific institution the Paris Academy of Sciences (1666-1803)*, Berkeley, University of California Press, 1971.
ID., *Le carriere scientifiche nella Francia del Settecento*, in CROSLAND 1979, pp. 151-164.
ID., *Science and the Arts in France the limitations of an encyclopedic ideology*, in PAYNE 1981, pp. 77-93.
A.R. HALL, *Da Galileo a Newton*, Milano, Feltrinelli, 1973.
ID., *La rivoluzione nella scienza 1500-1750*, Milano, Feltrinelli, 1986.
N. HAMMERSTEIN, *Accademie e società scientifiche in Leibniz*, in BOEHM e RAIMONDI 1981, pp. 395-419.
N. HANS, *New trends in education in the Eighteenth century*, London, Kegan Paul, 1951.
F.J. JOHNSON, *Il Gresham College precursore della Royal Society*, in WIENER e NOLAND 1971, pp. 337-361
H. KEARNEY, *Scholars and gentlemen Universities and society in pre-industrial Britain 1500-1700*, Ithaca, Cornell University Press, 1970.
ID., *Puritanism, capitalism and the scientific revolution*, in WEBSTER 1974.
F. KRAFT, *Luoghi della ricerca naturale*, in BOEHM e RAIMONDI 1981, pp. 421-460.
TH KUHN, *La tensione essenziale*, Torino, Einaudi, 1985.
J. LE GOFF, *Il genio del Medioevo*, Milano, Mondadori, 1959
P. MATHIAS (a cura di), *Science and society 1600-1900*, Cambridge, Cambridge University Press, 1972.
M. MAYLENDER, *Storia delle accademie d'Italia*, 5 voll., rist. anastatica dell'edizione del 1926-1930, Bologna, Forni, 1976.
R. MERTON, *Scienza, tecnologia e società nell'Inghilterra del XVII secolo*, Milano, Angeli, 1975.
A.E. MUSSON (a cura di), *Science, technology and economic growth in the Eighteenth century*, London, Methuen, 1972.
G. OLMI, *Federico Cesi e i Lincei*, in BOHEM e RAIMONDI 1981, pp. 169-237.
H.C. PAYNE (a cura di), *Studies in the Eighteenth century culture*, Madison, University of Wisconsin Press, 1981.
C. PECORELLA, *Note sulle classificazioni delle accademie italiane nei secoli XVI-XVIII*, in «Studi Sassaresi», III, 1968-1969, 1, pp 206-231.
A. QUONDAM, *La scienza e l'accademia*, in BOEHM e RAIMONDI 1981, pp 21-68.
P. ROSSI, *I filosofi e le macchine 1400-1700*, Milano, Feltrinelli, 1971.
J.J. SALOMON (a cura di), *Problems of science policy*, Paris, OECD, 1968
ID., *Science and politics*, Cambridge (Mass.), MIT Press, 1973.
CH. B. SCHMITT, *La scienza nelle Università italiane*, in CROSLAND 1979, pp. 45-68.
R.E. SCHOFIELD, *The Lunar Society of Birmingham A social history of provincial science in Eighteenth-century England*, Oxford, Clarendon Press, 1963.
E. SHILS, *The profession of science*, in «Advancement of Science», XXIV, 1969, pp. 469-480.

M.H. SOLOMON, *Public welfare, science and propaganda in Seventeenth century France*, Princeton University Press, 1972.
TH. SPRAT, *A history of the Royal Society of London* (1667), ediz. anast., London, Kegan Paul, 1966.
S. STELLING-MICHAUD, *La storia delle Università nel Medioevo e nel Rinascimento*, in ARNALDI 1974, pp. 153-217.
W. TEGA (a cura di), *Anatomie accademiche I, I Commentari dell'Accademia delle Scienze di Bologna*, Bologna, Il Mulino, 1986.
ID. (a cura di), *Anatomie accademiche II, L'enciclopedia scientifica dell'Accademia delle Scienze di Bologna*, Bologna, Il Mulino, 1987.
G. TIRABOSCHI, *Storia della letteratura italiana*, Venezia, 1795, 16 voll.
M. TORRINI, *L'Accademia degli Investiganti*, in *Accademie scientifiche*, 1981, pp. 845-883.
CH. WEBSTER (a cura di), *The intellectual revolution of the XVIIth century*, London, Kegan Paul, 1974.
ID., *La grande instaurazione scienza e riforma sociale nella rivoluzione puritana*, Milano, Feltrinelli, 1981.
PH. WIENER e A. NOLAND (a cura di), *Le radici del pensiero scientifico*, Milano, Feltrinelli, 1971.

I. *Il fascino della magia e l'immagine della scienza*
(di Paolo Rossi)

1. Magia, astrologia, alchimia. - 2. Maghi, astrologi, alchimisti: occultismo e sperimentalismo. - 3. La segretezza del sapere magico. - 4. La polemica contro la magia e l'immagine moderna della scienza. - 5. Tradizione ermetica e rivoluzione scientifica. - 6. L'uguaglianza delle intelligenze.

1. *Magia, astrologia, alchimia.*

Le caratteristiche fondamentali della visione magico-rinascimentale del mondo (del cosiddetto «naturalismo» del Cinquecento) emergono con chiarezza dai testi dei principali pensatori di quel periodo nel quale, anche in polemica con l'aristotelismo della Scolastica, è presente un interesse vivissimo per la filosofia platonica. Solo il *Fedone*, il *Menone*, parti del *Timeo* erano stati noti alla cultura medioevale. Marsilio Ficino (1433-1499) aveva tradotto in latino il corpo dei dialoghi platonici e le *Enneadi* di Plotino (III sec. d.C.). Aveva riproposto alla cultura europea una sistematica utilizzazione del platonismo congiungendolo agli ideali di una «pace filosofica» e mostrandone la convergenza con la tradizione cristiana. I quattordici trattati del *Corpus hermeticum*, che Ficino tradusse fra il 1463 e il 1464, ebbero vastissima diffusione manoscritta. Fra il 1471 e la fine del Cinquecento ne furono stampate sedici edizioni. Quei testi risalgono al II secolo d.C., ma da Marsilio Ficino (e per tutto il Cinquecento) furono attribuiti al leggendario Ermete Trismegisto, fondatore della religione degli Egizi, contemporaneo di Mosè e indiretto maestro di Pitagora e di Platone. A quei testi è legata la grande rinascita della magia del tardo Quattrocento e del Cinquecento ed essi continuano ad operare fortemente nella cultura europea fino alla metà del Seicento. Tutta la grande eredità magico-astrologica del pensiero antico e medievale veniva, attraverso quegli scritti, inserita in un vasto e organico quadro platonico-ermetico. In esso dominano la tendenza a cogliere l'Unità

che è, nel profondo, sottesa alle differenze; l'aspirazione a conciliare le distinzioni; l'esigenza verso una totale pacificazione nell'Uno-Tutto.

Magia, astrologia, alchimia sono difficilmente isolabili, come realtà a sé stanti, da un più generale contesto mitico-religioso. Non dobbiamo pensare a tre diverse «discipline» nel senso moderno del termine. Principalmente per due ragioni: in primo luogo perché esiste all'interno di quella cultura una connessione strettissima fra la pratica magica (e anche alchimistica) e l'*ora* o il momento nel quale essa viene attuata; in secondo luogo perché i confini tra filosofia naturale e sapere mistico, tra la figura di colui che conosce la natura e compie esperimenti e l'immagine dell'uomo che (come Faust) ha venduto l'anima al diavolo per conoscere e dominare la natura apparvero spesso, agli uomini di quell'età, assai labili e sottili. La *natura*, pensata dalla cultura magica, non è solo materia continua e omogenea che riempie lo spazio, è un Tutto-vivente che ha in sé un'anima, un principio di attività interno e spontaneo. Quell'anima-sostanza è, come per gli antichi pensatori ionici del V secolo a.C., «piena di demoni e di dèi». Ogni oggetto del mondo è ricolmo di occulte simpatie che lo legano al Tutto. La materia è impregnata di divino. Le stelle sono viventi animali divini. Il mondo è l'immagine o lo specchio di Dio e l'uomo è l'immagine o lo specchio del mondo. Fra il grande mondo o *macrocosmo* e il *microcosmo* o mondo in piccolo (e tale è l'uomo) esistono puntuali corrispondenze. Le piante e le selve sono i capelli e i peli del mondo, le rocce le sue ossa, le acque sotterranee le sue vene e il suo sangue. E l'uomo è l'ombelico del mondo. È al suo centro. In quanto specchio dell'universo, l'uomo è in grado di rivelare e di cogliere quelle segrete corrispondenze. Il mago è colui che sa penetrare entro questa realtà infinitamente complessa, entro questo sistema di corrispondenze e di scatole cinesi che rimandano al Tutto, entro le quali il Tutto è racchiuso. Egli conosce le catene di corrispondenze che discendono dall'alto e sa costruire — mediante invocazioni, numeri, immagini, nomi, suoni, accordi di suoni, talismani — una ininterrotta catena di anelli ascendenti. L'amore è il *nodus* o la *copula* che stringe indissolubilmente l'una all'altra le parti del mondo. Esse appaiono a Ficino «collegate le une alle altre da una sorta di reciproca carità, ... membra di un solo animale, reciprocamente unite dalla comunione di una sola natura». Vitalismo e animismo, organicismo, antropomorfismo sono categorie costitutive del pensiero magico. In esso domina, come videro con chiarezza Freud e Cassirer, l'idea dell'identificazione fra io e mondo, della «onnipotenza del pensiero».

L'astrologia, che fu considerata nel mondo greco-romano un sapere esatto fondato su calcoli precisi e che ha senza dubbio (assai più che la magia e l'alchimia) il carattere di un sapere «pubblico» o trasmissibile, è stata esattamente definita come «una religione astrale in sembianze scien-

tifiche». Nel corso della sua lunghissima storia si sono sempre ambiguamente mescolate in essa l'idea di un Cielo che opera sulla Terra mediante forze calcolabili e l'idea di una identificazione degli astri con le divinità da cui prendono il nome. L'astrologia non fu solo, né prevalentemente, una visione fisica dell'universo. Nasce sul terreno di una integrale umanizzazione del cosmo, di una estensione a tutto l'universo dei comportamenti e delle emozioni dell'uomo. Le stelle non sono soltanto corpi mossi da forze. Sono esseri viventi e divini, dotati di un sesso e di un carattere, capaci di riso e di pianto, di odio e di amore. I nomi dei pianeti non sono meri simboli (come i nomi odierni delle galassie). Le «figure» delle costellazioni non sono immagini convenzionalmente assunte. Hanno potere evocativo, seducono e imprigionano la mente, rendono reale la presenza dell'oggetto cui si riferiscono (così come avviene nelle «invocazioni» della religione e della magia), rivelano gli esseri che si identificano con le stelle e in esse si incorporano. Come già recitava Stobeo (VI sec. d.C.), «sette astri erranti girano in cerchio alle soglie dell'Olimpo: la Luna che brilla nella notte, il lugubre Kronos, il dolce Sole, Afrodite che prepara il letto nuziale, l'impetuoso Ares, Ermete dalle rapide ali e Zeus autore primo di ogni nascita. Questi stessi astri hanno ricevuto in sorte la razza umana e v'è in noi la Luna, Zeus, Ares, Afrodite, Kronos, il Sole, Ermete. Questo è il nostro destino: dal fluido etere ricavare lacrime, riso, collera, generazione, parola, sonno, desiderio». L'astrologo opera su questo terreno di poteri che possono essere favorevoli o nemici. Si colloca di fronte a un cielo popolato di forme, che è scena incessante di combattimenti e di riposi, di odi e di amori. Secondo il motto attribuito a Tolomeo (II sec. d.C.) e riprodotto in tutti i manuali di astrologia, «il sapiente dominerà le stelle»: quel dominio si esercita più nelle forme della retorica che in quelle della logica. Alleandosi con alcune forze naturali per combatterne altre, l'astrologo intende «convincere» la natura. I suoi calcoli, gli strumenti di cui fa uso non sono separabili né da questo sfondo «religioso», né da questi suoi fini.

Anche nei testi alchimistici è prevalente (e diventa spesso quasi ossessivo) l'uso di scambi semantici, di slittamenti di significati, di analogie, di metafore. Oscurità e allusività nascono, ancora una volta, su un terreno iniziatico-religioso. La descrizione, sistematicamente e non occasionalmente, *allude* ai dati e non intende affatto comunicarli. Come scriveva Pietro Bono da Ferrara (XIV sec.) nella *Introductio ad artem chemiae* — un testo ristampato nel 1602 e largamente diffuso — nessuno poté mai raggiungere il segreto dell'Arte mediante il suo ingegno naturale: «né secondo la ragione naturale, né secondo l'esperienza naturale, perché esso — a guisa di un mistero divino — è al di sopra della ragione e dell'esperienza». Non mancano certo, nelle ricerche degli alchimisti, connessioni fra teorie ed esperimenti. Ma al di là di

tali connessioni si apre un terreno che le trascende. Il *lapis* (la pietra filosofale) è il fondamento delle trasmutazioni ed è insieme un principio divino al quale si addice ogni nome e il cui significato non può essere compiutamente espresso da nessun predicato. Il riferimento ad un elemento non implica quasi mai una descrizione delle sue caratteristiche. Gli alchimisti non parlano mai dello Zolfo concreto o dell'oro concreto. L'oggetto non è mai completamente se stesso: è sempre anche segno di altro, di una realtà che supera il piano dell'esistenza e che è ad esso irriducibile. L'idea (connessa con eredità aristoteliche) che si dia nell'universo un'unica materia «specificata» in forme differenti e che sia quindi possibile rimuovere le forme provvisorie e sostituirle con altre forme (come in una sorta di «tintura») non andò mai disgiunta dall'idea che i Principi costitutivi del mondo materiale si identifichino con elementi spirituali. Nella dottrina di Paracelso lo Zolfo si identifica con l'Anima, il Mercurio con lo Spirito, il Sale con il Corpo. Sale, Mercurio e Zolfo costituiscono anche i tre esseri dell'uomo. I Principi sono maschile e femminile, le combinazioni fra elementi sono accoppiamenti e congiungimenti. Vita e trasmutazioni, spiriti, vapori, esalazioni, morti e trasmutazioni, uccisioni e divorazioni, semi e generazioni: il linguaggio dell'alchimia non è fatto di metafore. Come ha visto bene C. Gustav Jung, quelle metafore rinviano a un mondo verticale di soffi e di influenze, tentano di saldare insieme la vita degli elementi e quella dell'inconscio. La «traduzione» dei testi dell'alchimia nel linguaggio della chimica moderna è un'impresa disperata. Come ha scritto F.S. Taylor, il chimico che esamina oggi le opere alchimistiche «prova la stessa impressione che proverebbe un muratore che volesse trarre informazioni pratiche per il suo lavoro dai testi (dedicati all'"arte muraria") della massoneria».

L'universo o il mondo della magia è stato più volte avvicinato, nella cultura del tardo Ottocento e del Novecento, al mondo dell'infanzia e a quello della schizofrenia: in ciascuno di questi mondi i nomi delle cose non si limitano a rimandare ad esse. Rinviano alle cose e *sono* le cose stesse.

2. *Maghi, astrologi, alchimisti: occultismo e sperimentalismo.*

Le molteplici serie di attività che si è soliti designare con il generico termine di *magia* hanno la fortissima tendenza a diventare difficilmente distinguibili da altre attività, solitamente designate con altri nomi. La magia, come ha scritto D.P. Walker, è sempre sul punto di risolversi in arte, in scienza, in psicologia applicata, in religione. È questo un punto importante: non si diventa maghi, nell'ambito della magia naturale né in quello della magia demoniaca, così come si può diventare oggi dottori commercialisti o

professori di biologia o fisici teorici. Per una ragione molto semplice: perché nell'universo della magia il sapere e la verità hanno una caratteristica fondamentale. Non sono accessibili a tutti gli uomini né in linea di fatto né in linea di principio. A proposito della magia si è sempre usato, e non per caso, il termine *iniziazione*. Per giungere ad essere un mago e per praticare la magia è necessario che l'uomo giunga a partecipare ad un principio che è superiore alla sua natura. Bisogna conferire a se stessi un modo d'essere quasi divino, che metta in grado di compiere opere miracolose o ammirande. La definizione che San Tommaso dava della grazia *quaedam similitudo divinitatis partecipata in homine* potrebbe, isolata dal suo contesto, essere inserita in molti testi di magia.

Le tecniche magiche e quelle alchemiche sono, insieme, una via per operare sul mondo e un processo di rigenerazione religiosa. La conoscenza magica è anche salvezza. Il processo che conduce al raggiungimento della perfezione individuale coincide con quello che conduce al dominio sulla natura. Non a tutti è dato di raggiungere la perfezione. Non a tutti è dato, di conseguenza, di conoscere la natura e di dominarla. La disciplina ascetica, il distacco dal mondo, l'ascolto della parola del maestro, l'illuminazione, la capacità di sollevarsi a un livello inattingibile ad altri uomini sono anch'essi elementi costitutivi del sapere magico. Su questo piano nascono e si intrecciano temi che ricompaiono in innumerevoli testi, che vengono ripresi da autori diversi e lontani nel tempo, che si configurano, in certa misura, come delle costanti: 1) il carattere segreto e riservato del sapere, la cui diffusione presso il volgo avrebbe conseguenze nefaste; 2) la grande difficoltà e complicazione dei procedimenti e dei rituali che conducono alla verità, a vedere ciò che gli altri non riescono a vedere; 3) la distinzione fra l'esigua schiera dei sapienti o «veri uomini» e la massa degli indotti; 4) il carattere eccezionale della figura e della personalità del mago che è giunto a un livello di sapienza-perfezione che lo rende diverso, che lo fa vivere e operare su un piano che è inaccessibile ai profani e ai non rigenerati.

Da questo intreccio di temi nascono prevalentemente conferme. Il mondo magico è compatto e totalitario. Non viene facilmente incrinato, né soffre smentite. Il carattere mirabile delle imprese realizzate dal mago non offre forse conferma della sua appartenenza alla schiera degli eletti? e la distinzione fra eletti e volgo non implica forse la necessaria segretezza di un patrimonio di idee nel quale le verità profonde devono essere velate fino ad apparire irriconoscibili? la estrema difficoltà delle procedure non dipende forse dalla incapacità della maggioranza degli uomini di avvicinarsi ad esse? la ambiguità e la allusività della terminologia non dipendono forse *insieme* dalla complicazione dei procedimenti e dalla necessità di riservare a pochi la conoscenza? comprendere la verità non *mediante* il linguaggio che si usa, ma

nonostante tale linguaggio, non è forse un mezzo per verificare la propria appartenenza alla esigua schiera degli eletti?

La magia, si è detto, *tende sempre a risolversi* in psicologia o in religione. Ma *non coincide* né con la psicologia, né con la religione, né con il misticismo. Così come nell'astrologia convivono calcoli sofisticati e vitalismo antropomorfico, allo stesso modo, nella magia e nell'alchimia, convivono misticismo e sperimentalismo. I libri della grande magia del Rinascimento si presentano ai nostri occhi come il frutto di una strana mescolanza. Troviamo, in uno stesso grosso manuale, pagine di ottica, di meccanica e di chimica, ricette di medicina, insegnamenti tecnici sulla costruzione di macchine e di giochi meccanici, codificazione di scritture segrete, ricette di cucina, di veleni per vermi e topi, consigli per i pescatori, i cacciatori e le massaie, suggerimenti attinenti all'igiene, alle sostanze afrodisiache, al sesso e alla vita sessuale, squarci di metafisica, riflessioni di teologia mistica, richiami alla tradizione sapienziale dell'Egitto e dei profeti biblici, riferimenti alle filosofie classiche e ai maestri della cultura medievale, consigli per i prestidigitatori. Non basta: perché la magia — e basta pensare a Giordano Bruno, a Cornelio Agrippa, a Tommaso Campanella — si connette profondamente a desideri di riforma della cultura, al Millenarismo, ad aspirazioni ad un radicale rinnovamento politico.

Come molti dei maghi del Rinascimento, Cornelio Agrippa di Nettesheim (1486-1535) gira tutta l'Europa da Colonia a Parigi, alla Spagna, all'Italia, alla Svizzera. Si spinge fino in Sardegna e a Brindisi per gettare le basi di un sodalizio capace di rinnovare, su basi ermetiche, la cultura e la società. La sua opera maggiore è il *De occulta philosophia* (1533), ma nel libro *De incertitudine et vanitate scientiarum* (1530) troviamo presente una definizione di magia sulla quale, tenendo conto di quanto si è detto sopra sullo sperimentalismo, converrà riflettere. La magia naturale, distinta da quella nera o demoniaca, «contempla la forza di tutte le cose naturali e celesti», considera il loro ordine, congiunge le cose inferiori con le superiori e le attive con le passive, in modo tale che «spesse volte ne nascono stupendi miracoli, non tanto per l'arte quanto per la natura alla quale quest'arte si dà per ministra». I maghi sono «diligenti esploratori della natura» e sono in grado di produrre effetti che «anticipano» quelli che la natura è in grado di produrre da sola (come se qualcuno facesse nascere rose nel mese di marzo). Le operazioni del mago non sono contro natura, ma provengono da essa. I miracoli della magia sono, in senso etimologico, cose degne di essere ammirate, non sono, come i miracoli dei Santi, violazioni delle leggi di natura (Agrippa 1659, 57).

Questi stessi temi sono presenti nell'opera dell'italiano Giambattista della Porta (morto nel 1615) che pubblica nel 1558 (in edizione più ampia nel

1589) il trattato *De magia naturali* nel quale appaiono descrizioni di trucchi (a volte molto banali), tecniche per la falsificazione, precetti sulla distillazione, capitoli sul magnetismo, sull'idraulica, sull'ottica. Soprattutto su quest'ultimo terreno, alcuni esperimenti del Porta si configurano come non dissimili da ciò che verrà più tardi chiamato «esperimento scientifico». A differenza di molti autori tardomedievali e di molti suoi contemporanei, Porta non considera le lenti come «ordigni fallaci» che deformano la realtà, ne proclama l'utilità e ne descrive i molteplici usi. Manifesta spesso scetticismo verso antiche credenze (per esempio che i poteri della magnetite possano essere eliminati strofinandola con l'aglio) e vede nella magia «la filosofia naturale portata a compimento». Le operazioni magiche appaiono miracolose perché le loro cause sono note all'operatore e ignote allo spettatore. Il mago, da questo punto di vista, non va scambiato per un creatore.

Il matematico, fisico e medico pavese Girolamo Cardano (1501-1576) insiste anch'egli nell'autobiografia (il *De vita propria* fu pubblicato a Parigi nel 1643) sull'utilizzazione, a fini pratici, dell'osservazione dei fenomeni e afferma di aver sempre trascurato la chiromanzia e l'arte che agisce mediante incantesimi ed evocazioni di spiriti. Nel *De subtilitate* (1550) afferma che solo esperienza e ragionamenti consentono di cogliere quella «sottigliezza» del reale che sfugge alle filosofie tradizionali. L'opera è una sorta di disorganica enciclopedia, ricchissima di temi, ove le teorizzazioni sulla simpatia e antipatia si associano a riflessioni sui sensi e le facoltà, sull'ottica, le virtù delle piante, la generazione animale, i fuochi d'artificio, le descrizioni di congegni e strumenti. La cosiddetta «sospensione cardanica» vi è presentata come un congegno che è in grado di mantenere stabile una sedia posta sulla tolda di una nave in un mare agitato.

Anche il domenicano calabrese Tommaso Campanella (1568-1639) presenta la magia come un'attività che «imita la natura aiutandola con l'arte» e che domina le altre scienze in quanto attività trasformatrice. Nel *De sensu rerum et magia* (1590) l'universo appare come un grande animale nel quale è presente uno spirito che proviene da Dio e che determina la simpatia che permea di sé il mondo: «sente il Cielo e la Terra e il mondo, e stan gli animali dentro a loro come i vermi dentro al ventre umano»; in ogni cosa «ci è appetito e amore e odio e aborrimento» (*De sensu*, I, 1, 25). Campanella si richiama — contemporaneamente — al naturalismo antiaristotelico del cosentino Bernardino Telesio (1509-1588) e alla tradizione platonica e neoplatonica. «I tempi sono tenebrosi e l'Anticristo è alle porte»: dall'astrologia e dalla dottrina dell'oroscopo delle religioni ricava la certezza di un imminente rivolgimento (il «secol novo») e l'immagine di una natura immutabile dalla quale emergono, insieme alle vicende naturali, anche quelle della storia umana e delle religioni. Il naturalismo telesiano tende a risolversi

in panpsichismo: la magia è fondata sulla certezza che tutte le cose «hanno senso». Il mondo è pieno di prodigi e l'originario legame fra le cose spiega gli effetti più straordinari: chi è morso da una tarantola guarisce, se muore la tarantola che lo ha morso. La magia può derivare da grazia divina, come in Mosè e nei profeti; dal patto con il demonio; può infine essere naturale e fra i suoi cultori sono da annoverare non solo astrologi e medici, ma oratori, poeti, legislatori.

L'astrologia, che occupa una posizione centrale nella riflessione di Campanella, fu ampiamente praticata nel corso del Cinquecento. Anche nella forma (ripetutamente proibita da appositi editti) dell'astrologia «giudiziaria» che non si limitava a previsioni di carattere generale, ma emetteva oroscopi personali. Le *effemeridi* o almanacchi astrologici che permettevano di calcolare gli oroscopi e di conoscere le eclissi e le congiunzioni dei pianeti ebbero larghissima diffusione. Nel 1537, a Parigi, venne pubblicamente condannato il teologo Michele Serveto (1511-1553) per aver tenuto pubbliche lezioni sull'elaborazione di oroscopi personali. Oroscopi e predizioni vennero effettuati non solo dal medico Jean Fernel (1487-1588), da Gerolamo Cardano, dal matematico Leonard Digges (1510 ca. - 1558 ca.). Uno dei maggiori astronomi del tardo Cinquecento, il danese Tycho Brahe (1546-1601), giunge ai suoi studi muovendo da interessi astrologici e non rinuncia mai a vedere nell'astrologia una legittima applicazione pratica della sua scienza. La *stella nova* del 1572, che segue di nove anni la congiunzione di Saturno e di Giove e che è seguita dall'apparizione di una cometa a distanza di cinque anni, gli sembra costituire sicura previsione di un'età di pace e di ricchezza che avrà inizio in Russia nel 1632 e si diffonderà su tutta la Terra. «Sono solito — scrive nel 1598 — chiamare l'alchimia astronomia terrestre perché le sostanze trattate hanno analogia con i corpi celesti e con le loro influenze». Keplero predice, dal canto suo, una carestia e una guerra con i Turchi per l'anno 1595. Lo stesso Galilei, così lontano da ogni concessione alle filosofie occulte, fa oroscopi per il Granduca di Toscana.

E tuttavia è vero, com'è stato notato, che l'astrologia è ridotta, dopo la metà del Cinquecento, in una posizione difensiva. Nella sua forma giudiziaria o «divinatrice» essa era stata sottoposta, nel tardo Quattrocento, allo spietato attacco di Pico della Mirandola (1463-1494). Contro l'affermazione di un rapporto necessario fra le vicende del Cielo e quelle del mondo, Pico aveva certo inteso rivendicare la libertà e la dignità dell'uomo. Ma ciò che appare da sottolineare nelle *Disputationes adversus astrologiam divinatricem* (1496) è l'acutezza della critica contro il carattere ibrido dell'astrologia, contro la compresenza, in essa, di religione e di scienza, di culti e di tecniche. Pico sa bene che il fascino che l'astrologia ha esercitato per tanti secoli sul genere umano nasce proprio da questo suo carattere composito, dal fatto che

quest'arte fa leva «sulla curiosità e sulla cupidigia umane», sulla naturale venerazione degli uomini per ciò che è antico. Essa fu creata da Egiziani e Caldei, popoli di «indole poco adatta al sapere e di ingegno rozzo, che non poterono astenersi dall'imputare agli astri le proprie colpe e le proprie pene». L'astrologia si presenta come «bella, veneranda, piena di autorità», ha in superficie aspetto di sapienza, ma della sapienza «ostenta solo l'aspetto e l'abito». In essa, che trasforma le stelle in animali e riempie il cielo di fiabe, è presente una nascosta «follia». L'astrologia «corrompe la filosofia, inquina la medicina, indebolisce la religione, genera e rafforza le superstizioni, tien viva l'idolatria, distrugge la prudenza, insozza i costumi, infama il Cielo, rende gli uomini meschini, tormentati, inquieti e li fa di liberi servi». Non ha come fine la conoscenza della realtà, ma «la gloria e il guadagno», non scopre mai la verità, ma «la incontra per caso». Sulla base di «congetture levissime» e di «tenui analogie» umanizza il cosmo, attribuisce agli astri emozioni e sentimenti, ritiene alcune stelle buone e altre cattive (Pico, 1952, III, 493, 501; II, 39, 43, 45, 177).

La cosiddetta *filosofia chimica*, che occupa un posto importante nella cultura scientifica del Seicento, ha indubbie origini ermetiche e trova la sua matrice teorica nell'opera grandiosa (che ha affascinato molti contemporanei e molti studiosi moderni) dello svizzero Philipp Aureolus Theophrast Bombast von Hohenheim, noto con il nome latino di Paracelsus (1493 ca. - 1541). Paracelso ebbe vita assai movimentata. Peregrinò a lungo per tutta Europa sollevando dibattiti, polemiche, aspre discussioni. Nella notte di San Giovanni del 1527 bruciò, in un falò eretto dagli studenti a Basilea, i libri di Galeno e di Avicenna. Portato alle polemiche violente, ebbe molti ammiratori e moltissimi nemici. Vide nella magia «una grande saggezza segreta» e nella ragione «una grande follia pubblica». Attaccò con violenza i teologi che definiscono ingiustamente la magia come stregoneria senza comprenderne la natura e, con violenza ancora maggiore, gli esponenti della medicina tradizionale. Presentò se stesso come un essere eccezionale: l'aggettivo inglese *bombastic* (che significa «altisonante» o «ampolloso») è ricavato dal suo nome. La medicina nuova, per Paracelso, è fondata su quattro «colonne»: la *filosofia* come conoscenza della natura invisibile delle cose; l'*astrologia* o determinazione dell'influsso degli astri sulla salute del corpo; l'*alchimia* che prepara medicine capaci di restaurare l'equilibrio turbato dalla malattia; l'*etica* o virtù e onestà del medico. La chimica è in correlazione stretta con la medicina e tale correlazione dà luogo a una disciplina nuova, la *iatrochimica* o chimica medica. L'alchimia serve soprattutto alla distillazione e analisi dei minerali per la preparazione di rimedi efficaci. La medicina non può interessarsi solo del corpo dell'uomo: «Ci si deve render conto che la medicina deve avere negli astri la sua preparazione e che gli astri divengono i

mezzi per la guarigione... la preparazione del medico dovrà essere intrapresa in modo tale che la medicina venga approntata per tramite celeste, alla stessa guisa di come hanno luogo le profezie e gli altri eventi celesti» (1973, 136). La teoria della corrispondenza macrocosmo-microcosmo è al centro di un complesso di temi derivanti dalla tradizione magico-alchimistica e da quella astrologica che si intrecciano a idee tipiche del misticismo neoplatonico. Gli spiriti invisibili o forze della natura costituiscono la sostanza vitale degli oggetti. Tali spiriti o *arcana* o *semina* primitivi derivano da Dio che ha creato le cose nella loro materia *prima* e non nella materia *ultima*: il mondo è un continuo processo di perfezionamento dalla materia prima alla ultima materia. Gli «elementi» paracelsiani sono *archetipi* nascosti negli oggetti naturali che conferiscono ad essi caratteristiche e qualità. Le sostanze concretamente trattabili e analizzabili non sono che approssimazioni o involucri dei veri elementi spirituali. La materia prima o *Mysterium Magnum* o *Iliastrum* è la madre o matrice di tutte le cose. Tale materia prima è di natura acquea. Gli altri tre elementi della tradizione (fuoco, terra, aria) sono anch'essi *matrici*. Piante, minerali, metalli, animali sono i *frutti* dei quattro elementi. Nell'*Archidoxis* (pubblicato postumo nel 1569 e scritto attorno al 1525) e nel *Liber de mineralibus* è individuabile, accanto alla teoria degli elementi come matrici dei corpi, anche una teoria dei principi, che sono Sale, Zolfo, Mercurio. I *tria prima* sono anch'essi sostanze spirituali e si identificano con il Corpo, l'Anima, lo Spirito. Il Sale è ciò che rende i corpi coesi, il Mercurio ciò che li rende fluidi, lo Zolfo ciò che li rende combustibili. I tre principi risultano qualitativamente diversi nei vari corpi ed esistono differenti zolfi, mercuri e sali a seconda delle varie specie esistenti in natura: «Una specie di Zolfo si trova nell'oro, un'altra nell'argento, un'altra nel piombo, nello stagno e così via. Vi è un'altra specie di Zolfo nelle pietre, nella calce, nelle fontane, nei sali. Non soltanto esistono molti Zolfi, ma anche molti Sali. Vi è un Sale nelle gemme, un altro nei metalli, un altro nelle pietre, un altro nei sali, un altro nel vetriolo, un altro nell'allume. Le stesse affermazioni valgono per il Mercurio».

La chimica è la chiave della struttura del mondo e la creazione è una divina «separazione» chimica: dapprima vengono separati l'uno dall'altro i quattro elementi; successivamente, dal Fuoco viene separato il Firmamento; dall'Aria gli spiriti; dall'Acqua le piante marine; dalla Terra il legno, le pietre, le piante terrestri, gli animali fino a giungere agli oggetti singoli e alle singole creature.

La medicina alchemica tende a configurarsi, attraverso l'opera di Paracelso, come un sistema separato di conoscenza magica che si pone, contemporaneamente, in alternativa alla Scolastica e al Galenismo. Nella medicina del Seicento inglese la figura di Paracelso si pone come dominante.

3. *La segretezza del sapere magico.*

In uno dei testi fondamentali dell'ermetismo magico del Rinascimento, il *Picatrix latinus* (l'originale arabo risale probabilmente al secolo XI), si affaccia fin dalle prime righe e ricompare di continuo il tema, al quale già ci siamo riferiti, della segretezza della magia. La magia fu celata dai filosofi. Essi non la rivelarono agli uomini e parlarono con parole segrete. E lo fecero per il loro bene, perché se questa scienza fosse stata resa accessibile, essi avrebbero sconvolto l'universo: «Rivolgiamo le nostre preghiere a Dio non solo perché illumini il tuo cuore e il tuo spirito, perché ti protegga e ti difenda dalle insidie degli uomini nocivi, ma affinché tu non riveli i tuoi segreti a nessuno che non sa, perché ciò provocherebbe la distruzione dei Santi e dei Profeti» (Perrone Compagni 1975, 298). L'*oratio* dei filosofi alchimisti — scrive Pietro Bono da Ferrara attorno al 1330 — è scritta «in termini enigmatici, con figure estranee e impossibili». I filosofi parlano una lingua ad essi solo nota che consente loro di intendersi reciprocamente escludendo tutti gli altri. La «preziosa gemma» dell'alchimia andrà comunicata a coloro che bramano ardentemente l'arte e sono dotti nei principi naturali, andrà occultata agli indotti e ai fanciulli (1602, 398).

Anche in Agrippa, che scrive due secoli più tardi, la segretezza della verità e delle procedure che consentono di raggiungerla è presentata connessa alla distinzione fra uomini divini e comuni mortali. «Confidare al volgo parole impregnate della maestà divina è un'offesa alla religione»: infatti Platone impedì la divulgazione dei misteri, Pitagora e Porfirio obbligavano al silenzio i loro discepoli, Orfeo e Tertulliano esigevano il giuramento del silenzio, Teodoto divenne cieco per aver tentato di penetrare i misteri della scrittura ebraica, Plotino, Origene e gli altri discepoli di Ammonio giurarono di non divulgare il verbo del maestro e Cristo stesso adombrò il suo verbo in modo che solo i discepoli più fidi potessero intenderlo. Ogni esperienza di magia, concludeva Agrippa, «abborre il pubblico, vuol essere nascosta, si fortifica nel silenzio e viene distrutta ove venga dichiarata» (*Opera*, I, 498).

Uniformità e ripetizione, come è stato tante volte rilevato, caratterizzano la letteratura magica. Ciò che colpisce, di fronte al tema della segretezza, non è la varietà, ma la immutabilità delle formule. In scritti composti in epoche diverse, separati l'uno dall'altro da un grande spazio di anni, ritornano le stesse citazioni, gli stessi autori, gli stessi esempi. Così come avviene nelle formule e nelle preghiere, che restano immutate nel tempo, ricompaiono gli stessi termini. Il *De magia veterum* o *Arbatel de magia*, stampato a Basilea nel 1575, si apre con queste parole: «Chi vuole conoscere i segreti, sappia segretamente custodire le cose segrete, riveli ciò che va rivelato e sigilli ciò

che va sigillato, non dia ai cani le cose sacre e non getti le perle davanti ai porci». Il mercurio sublimato, afferma Paracelso, diviene oro, argento, rame, ferro, appare fusibile come la cera, si liquefa al sole come la neve e torna alfine al suo stato primitivo. Si tratta di un segreto che è necessario tenere ben celato: «Un'oca preferirà una rapa a una gemma perciò il volgo non è degno di conoscere questo segreto e Dio ha espressamente vietato di dare le perle ai porci» (*Ibid.*, I, 576). Abbiamo posto dinanzi agli occhi del lettore — scrive Porta nella *Magia naturalis* — pochissimi esempi. Ma essi, e ciò che da essi si può ricavare, devono essere trattenuti con cuore fidato affinché non si sviliscano giungendo fra le mani degli uomini indotti che appartengono al gregge. Al gregge degli indotti farà riferimento, in pieno Seicento, anche il medico e mago inglese Robert Fludd (1574-1637) in una delle sue molte risposte a Keplero che lo aveva accusato di «dilettarsi con enigmi tenebrosi»: tutti i grandi filosofi, Ermete e Apuleio, Pitagora e Salomone e lo stesso Cristo «hanno grandemente lodato il silenzio e l'occultamento della sapienza segreta».

Per *tutti* gli esponenti della cultura magica ed alchimistica, per *tutti* i seguaci dell'ermetismo i testi dell'antica sapienza si configurano come libri sacri nei quali sono racchiusi segreti che solo pochi uomini possono decifrare. La verità è nascosta nel passato e nel profondo. Va ricercata e individuata al di là degli accorgimenti che furono saggiamente impiegati per nasconderla a coloro che non ne sono degni. Così come avviene per i testi sacri, è sempre necessario, nei testi della magia, andare continuamente *oltre la lettera*, alla ricerca di un messaggio di volta in volta più nascosto. Ciò vale per l'arte magica, per le immagini degli astrologi, per le metafore degli alchimisti. Riscrivere in un linguaggio chiaro i libri della magia non ha senso. Così come non ha senso rimproverare i maghi e gli alchimisti per le loro «oscurità».

Il confine fra la figura del mago e quella del sacerdote appare, in molti casi, difficilmente determinabile. Qualcosa di eccezionale e di sacro ha investito una figura umana e ha dato origine a una vita e una potenza che sono più che umane. Il volgo e gli ignoranti, afferma Gerolamo Cardano, esaltano in me la conoscenza che deriva dai sensi e dallo spirito di osservazione. Si tratta in realtà solo di un primo gradino, al di sopra del quale si colloca quella superiore conoscenza che deriva dallo studio delle cause e segue i dettami della scienza. Ma anche questo sapere non è davvero significativo: al di sopra di esso si colloca quella conoscenza delle cose astratte e immortali che deriva dal genio tutelare che assiste Cardano nel corso della vita, così come avvenne in altri tempi nel caso di Socrate, Plotino, Sinesio, Dione e Flavio Giuseppe. Dall'attività intellettuale a lungo esercitata deriva lo *splendore*. Esso è il coronamento pieno della natura umana, è

qualcosa che «si può indicare ma non descrivere», a differenza di quanto avviene per il «genio tutelare» che non è in nostro potere e che non è possibile né descrivere né indicare (1945, 175-176, 171, 118).

Si è visto che, in molti testi, i miracoli della magia vengono presentati non come violazioni di leggi naturali, ma come *mirabilia* o cose degne di ammirazione. Lo ripete anche Tommaso Campanella: ciò che appare magia agli inizi, quando le cause sono sconosciute, diventa in seguito «volgare scienza». La curiosità per la natura, l'interesse per le macchine e i congegni, lo sperimentalismo: se si accentuano questi elementi, la figura del mago rinascimentale sembra confondersi con quella dello scienziato baconiano che intende giungere anch'egli ad una «magia rinnovata» capace di accelerare i tempi di quei processi che in natura si svolgono con una lentezza eccessiva. La magia di Agrippa, nella quale sono presenti elementi negromantici ed esorcistici, è stata giustamente contrapposta alla magia ficiniana, raffinata, artistica, «psichiatrica», e, in ultima analisi pia e contemplativa. Quest'ultima, così come la magia di Pico, aspira solo ad operazioni di «magia naturale» nel mondo elementare. Ma basta un lieve spostamento di accento per trasformare il ritratto del mago, distaccato dal mondo e dalle comuni passioni ed emozioni del volgo, nel ritratto più inquietante di un essere eccezionale, semidemoniaco e semidivino, al quale si spalancano possibilità inaudite. Anche quando la magia rinascimentale accentua le caratteristiche di «naturalità» delle operazioni magiche fino a collegarle con il lavoro artigianale e a porsi come ministra e ancella della natura, essa non riuscirà mai a liberarsi né dalla ambigua concezione del *metodo come iniziazione*, né dalla immagine del mago come *eletto*. Basta sfogliare il *De occulta philosophia* di Agrippa per rendersi conto che ogni contrapposizione di una magia «religiosa», legata a temi soteriologici, ad una magia naturale, legata agli esperimenti e alle lavorazioni dei materiali, deve conservare caratteri molto sfumati. Il mago di Agrippa costringe gli elementi e vince la natura, attraversa il mondo elementare e quello celeste, diventa cooperatore ed emulo di Dio: «Talora noi, pur appartenendo alla natura, la dominiamo e realizziamo opere miracolose ed elevatissime, tali da rendere calmi i mari, mutare le stelle, piegare le divinità e asservire gli elementi». Il mago-sapiente si configura come un essere semidivino. La sua forza e la sua grandezza, così come le sue capacità di dominio, gli derivano da un destino eccezionale. A differenza di quanto accade per gli altri uomini, egli è in grado di conoscere il mondo e di operare su di esso. Robert Fludd si munisce della forza e delle armi di Ercole, si paragona all'Apostolo che ha combattuto contro la Bestia, si richiama al suo precettore Mosè dal quale ha ricavato la capacità di pronunciare parole che non appartengono alla sapienza umana (1659, 1, 5). Ai contemporanei Agrippa appare come Ercole e Plutone, Democrito ed Eraclito, Aristotele e

Diogene. Versi composti in suo onore lo cantano come «un filosofo e un eroe, il Diavolo, Dio e tutte le cose».

Le opere maggiori di Robert Fludd furono pubblicate fra il 1617 e il 1630: in esse confluivano le eredità di Paracelso e di Agrippa, il neoplatonismo, l'ermetismo e la cabala, i temi dei Rosacroce e le interpretazioni allegoriche della Scrittura. Nella insistenza di Fludd sulla differenza fra gli «uomini rigenerati» e coloro che hanno invece solo «forma e figura umana» riecheggiava un tema antichissimo. Fludd appartiene alla schiera, che fu assai numerosa e combattiva nel corso del Seicento, dei cosiddetti «ermetici reazionari», i quali continuavano a considerare come espressione dell'antica sapienza egizia i testi del *Corpus hermeticum* anche dopo che Isaac Casaubon, nel 1614, aveva dimostrato che essi sono falsificazioni cristiane e non sono certamente stati scritti dall'egiziano Ermete.

Negli anni in cui egli scriveva il tema della segretezza della magia era stato sottoposto ad una critica estremamente aspra. I filosofi che avevano elaborato quella critica avevano anche costruito una nuova immagine del sapiente e del suo rapporto con il resto del genere umano.

4. *La polemica contro la magia e l'immagine moderna della scienza.*

Fra i costruttori di questa immagine nuova del sapere spetta un posto centrale all'inglese Francis Bacon (1561-1626) al quale filosofi e scienziati del Seicento e più tardi gli esponenti dell'Illuminismo e del Positivismo guardarono come a uno dei grandi «padri fondatori» della scienza moderna. Non del tutto a torto. Perché è certo vero, come è stato tante volte ripetuto, che a Bacone non può esser fatta risalire nessuna di quelle «scoperte» scientifiche che hanno modificato in profondità l'orizzonte della scienza moderna. Ma è anche vero che egli dette un contributo decisivo alla costruzione dell'immagine moderna della scienza, dei suoi fini, dei valori che in essa sono presenti, dei modi in cui essa si pone nei confronti delle altre forme della vita culturale. La consapevolezza dell'importanza sociale della vita scientifica, la coscienza che i fini della scienza sono il progresso e il rinnovamento delle condizioni di vita dell'umanità, la collaborazione organizzata e pianificata fra i ricercatori sono fenomeni della vita culturale, inglese ed europea, che si richiamano in modo esplicito al suo nome e al suo insegnamento.

Nella *Instauratio Magna* e nel *Novum Organum* (pubblicati nel 1620) venivano rifusi concetti e idee presenti in una serie di opere inedite (*Temporis partus masculus*, *Cogitata et Visa*, *Redargutio philosophiarum*); il *De dignitate et augmentis scientiarum* (pubblicato nel 1623) ripresentava in forma più ampia e in edizione latina il testo dell'*Advancement of learning* che era stato

pubblicato nel 1605. In questi, come in altri suoi scritti, Bacone dà una definizione molto precisa della cultura magico-alchimistica. La magia naturale « raccoglie credule e superstiziose nozioni e osservazioni di simpatie e antipatie e proprietà occulte ed esperimenti futili, strani più per l'apparato in cui si presentano che non in se stessi » (1975 [1605], 234). Essa è tanto lontana dalla scienza quanto la storia di re Artù è lontana, per la verità storica, dai *Commentari* di Cesare. Il mago « dà ali alla sua immaginazione, perde il senso delle proporzioni, si ripromette il conseguimento di oggetti immensi » (*Ibid.* [1608], 366). Bacone, che amava non poco le classificazioni e le tipologie, qualificò la Scolastica come un *sapere contenzioso*, l'Umanesimo come un *sapere delicato*, la magia e l'ermetismo del suo tempo come un *sapere fantastico o superstizioso*. Il rifiuto dell'« iniquo e fallace connubio » tra indagine sulla natura e discorso mistico-religioso è all'origine della sua antipatia per il platonismo. Esso gli appare una filosofia « detestabile » perché riconduce i fenomeni naturali a principi spirituali secondo una visione gerarchica e « ascendente » del mondo, perché mescola la filosofia naturale con la teologia ed è all'origine del pensiero di quei moderni che pretendono di fondare la fisica sul libro della Genesi o su altre parti della Scrittura. Il platonismo è, ai suoi occhi, una filosofia « fantastica e tumida, quasi poetica » che blandisce le intelligenze e attira a sé gli ingegni migliori e che è necessario combattere perché non v'è nulla di più pericoloso « delle stoltezze capaci di suscitare venerazione ». Il rifiuto baconiano della magia è saldamente collegato a questa polemica contro il platonismo: una intera concezione del mondo veniva rifiutata nel momento in cui, accanto alla dottrina dell'uomo-microcosmo, Bacone respingeva la concezione del mondo come « immagine vivente » di Dio. Sui « divini misteri », la filosofia naturale baconiana non ha nulla da dire. Se lo studio del mondo non rivela nulla su Dio, se la lettura del libro della Natura va tenuta rigidamente separata da quella della Scrittura, allora l'analisi delle « forme » e degli « schematismi » non rivela alcuna forza divina operante nel mondo. L'uomo, per Bacone, non è al centro di corrispondenze segrete; l'universo non è contesto di simboli che corrispondono a divini archetipi; l'impresa scientifica non assomiglia affatto ad una incomunicabile esperienza mistica.

Nel *Temporis partus masculus* (ca. 1603) Bacone aveva qualificato Paracelso un mostro, un « fanatico accoppiatore di fantasmi », la cui ricerca era accompagnata dalle fanfare dell'ostentazione, dai sotterfugi dell'oscurità, dalle connivenze con la religione; aveva satireggiato ferocemente la figura di Agrippa qualificándolo « un triviale buffone che fa di ogni cosa un'ignobile farsa », si era scagliato contro Cardano e lo aveva definito « un affannato costruttore di ragnatele in continua contraddizione con le cose e con se stesso ». Le ragioni di questa violenta polemica si chiarivano meglio nella

Redargutio philosophiarum (1607-8): se in mezzo a falsità innumerevoli la magia realizza qualcosa, ciò viene fatto in vista della novità o per suscitare ammirazione, non in vista dell'utilità. È compito della filosofia, proseguiva, far sì che tutte le cose appaiano, per effetto delle dimostrazioni, meno ammirevoli di quanto sono in realtà. È invece proprio dell'impostura far apparire le cose più ammirevoli di quanto non sono effettivamente. Qui Bacone colpiva alle radici, con straordinaria forza di penetrazione, uno degli atteggiamenti caratteristici della magia in genere e di quella rinascimentale in specie. Tecnica e arti meccaniche, che appaiono a Bacone in grado di migliorare le condizioni di vita degli uomini e che vanno poste a servizio dell'ideale cristiano della carità, diventano, nelle mani dei maghi e degli alchimisti, strumenti di manipolazione, mezzi che alcuni uomini impiegano per dominarne altri.

Il nuovo sapere, al quale guarda Bacone, deve abbandonare il terreno della genialità incontrollata, del caso, delle sintesi affrettate. Il rilievo che egli dà ai fattori sociali nella ricerca pone la sua filosofia su un piano radicalmente diverso da quello nel quale si erano mossi filosofi ermetici, maghi, alchimisti. L'insistenza di Bacone sugli aspetti organizzativi e istituzionali della scienza, i suoi progetti diretti alla creazione di giardini botanici, biblioteche, laboratori, alla riforma radicale delle università inglesi, la sua stessa convinzione della necessità di un interessamento del potere politico alla riforma della cultura nascevano dalla sua convinzione che la scienza — per usare il suo immaginoso linguaggio elisabettiano — non si identifica né con un letto per riposare, né con un portico per passeggiare, né con una torre dall'alto della quale soddisfare le proprie personali ambizioni, né con un mercato. Lo sforzo organizzato e controllato dell'intero genere umano, la cautela nelle ipotesi, il paziente accertamento dei fatti devono sostituire le illuminazioni individuali, la fiducia nelle forze del singolo, la audacia delle analogie, la convinzione che poteri eccezionali e doti straordinarie siano necessari per la scoperta della verità.

Bacone ha affermato ripetutamente che il metodo della scienza da lui progettato non lasciava gran parte al genio singolo ed «eguagliava in qualche modo le intelligenze». Questa affermazione non esprime affatto una ottimistica fiducia nel carattere «meccanico» di un metodo capace di funzionare da solo. È, ancora una volta, una presa di posizione contro il carattere di eccezionalità delle procedure magico-alchimistiche. In esse il risultato è affidato ad un procedimento segreto dovuto alla eccezionalità di un singolo individuo. In opposizione a questa segretezza, Bacone avanza l'esigenza di procedimenti fondati su un ideale di divisione del lavoro e di continuità progressiva della ricerca. In questo senso afferma di «ritenere pericolose la sottigliezza e la precipitazione degli ingegni quando essi sono

trasportati dal loro stesso movimento». In questo senso intende fornire agli intelletti «non penne ed ali, ma piombo e pesi». Gli uomini non si sono infatti finora accorti, concludeva, «di quanto severa sia la ricerca della verità». Uno zoppo che segue la via giusta, ribadisce in un celebre aforisma, arriva prima di un corridore che segue una strada sbagliata (*Novum Organum*, I, 104).

Ciò che Bacone accoglie dalla tradizione della magia rinascimentale è il concetto del *sapere come potenza*, di una scienza che si fa *ministra della natura* per prolungarne l'opera e portarla a compimento, che giunge infine a farsi padrona della realtà e piegarla, quasi per astuzia e attraverso una continua tortura, a servizio dell'uomo. Riprendendo questi temi — e quello della congiunzione delle «teorie» con le «opere» era destinato a rimanere centrale nell'età moderna — egli ne mutava profondamente il senso, li inseriva in un contesto diverso, ne mutava il significato. Nel suo discorso era stata respinta l'immagine del sapiente e la nozione di sapere che avevano fatto da sfondo alla concezione magica di una trasformazione della natura e alla definizione magica dell'uomo.

5. *Tradizione ermetica e rivoluzione scientifica.*

È indubbiamente vero che i bordi di quell'incredibile e bellissimo arazzo che fu tessuto nell'età del Rinascimento da maghi e alchimisti si sovrappongono in più punti al tessuto della scienza e della tecnica moderne. Ed è anche vero che magia e scienza costituiscono, alle soglie della modernità, un intreccio non facilmente districabile. L'immagine, di derivazione illuministica e positivistica, di una marcia trionfale del sapere scientifico attraverso le tenebre e le superstizioni della magia sembra oggi definitivamente tramontata. Attraverso una serie di studi importanti (W. Pagel, E. Garin, F.A. Yates, D.P. Walker, A. Debus) si è giunti a rendersi conto, con sempre maggiore chiarezza, del peso rilevante che la tradizione magico-ermetica ebbe ad esercitare sul pensiero di non pochi fra gli esponenti della rivoluzione scientifica.

Nella sua difesa della centralità del Sole, Niccolò Copernico (1473-1543) invoca l'autorità di Ermete Trismegisto. A Ermete e Zoroastro si richiama William Gilbert che identifica la sua dottrina del magnetismo terrestre con la tesi dell'animazione universale. Lo stesso Bacone parla di «percezioni», «desideri», «avversioni» della materia ed è fortemente condizionato, nella elaborazione della sua dottrina delle *forme*, dal linguaggio e dai modelli presenti nella tradizione alchimistica. Quando egli pone in luce le difficoltà che derivano «dalla contemporanea introduzione di più nature in un corpo solo» si muove entro un ordine di problemi tipicamente alchimistico. E ciò

appare ancora più chiaramente quando egli accetta la tesi che il fuoco possa far apparire sostanze non preesistenti e riconosce che la ricerca degli alchimisti tende (nonostante i loro numerosi errori) allo stesso scopo verso il quale sono diretti i suoi tentativi (*Novum Organum*, II, 7). Johannes Kepler (1571-1630) è un conoscitore profondo del *Corpus hermeticum*. La sua convinzione di una segreta corrispondenza fra le strutture della geometria e quelle dell'universo, la sua tesi di una musica celeste delle sfere sono profondamente imbevute di misticismo pitagorico. Tycho Brahe, come si è visto, vedeva nell'astrologia una legittima applicazione della sua scienza. René Descartes, la cui filosofia è diventata per i moderni il simbolo della chiarezza razionale, e che giungerà nella maturità al radicale rifiuto di ogni simbolismo, anteponeva, da giovane, i risultati dell'immaginazione a quelli della ragione; si dilettava, come avevano fatto tanti maghi del Cinquecento, alla costruzione di automi e di «giardini d'ombre»; insisteva, come avevano fatto tanti esponenti del lullismo magico, sull'unità e l'armonia del cosmo: «Nelle cose v'è una sola forza attiva, che è amore, carità, armonia... Ogni forma corporea agisce per mezzo dell'armonia». Sono temi che, in chiave diversa, ricompaiono anche in Leibniz, nella cui logica confluiscono temi attinti alla tradizione del lullismo ermetico e cabalistico. Leibniz vedeva nella nuova logica o *ars characteristica* una nuova «magia naturale». La sua idea di armonia, va aggiunto, è fondata sulla lettura appassionata di testi ai quali ben difficilmente si potrebbe attribuire la qualifica di «scientifici». Nelle pagine del *De motu cordis* di William Harvey (1578-1657), nella sua esaltazione di un governo unico e centrale della vita e del cuore come «Sole del microcosmo» sembravano saldarsi insieme eliocentrismo astronomico e cardiocentrismo fisiologico. Riecheggiavano ancora una volta, nel suo testo, i temi della letteratura solare e ermetica del Quattrocento e del Cinquecento. Anche nella concezione newtoniana dello spazio come *sensorium Dei* sono state rilevate influenze delle correnti neoplatoniche e della cabala giudaica. Newton non solo leggeva e riassumeva testi alchimistici, ma dedicò a ricerche di tipo alchimistico molte ore della sua vita. Dai suoi manoscritti risulta anche chiara la sua fede in una *prisca theologia* (che è il tema centrale dell'ermetismo) la cui verità deve essere «provata» mediante la nuova scienza sperimentale.

Per tracciare provvisorie linee di demarcazione fra «maghi» e «scienziati» del tardo Cinquecento e del primo Seicento è scarsamente utile sottolineare differenze fondate su generici appelli all'esperienza o sulla rivolta alle *auctoritates*. Girolamo Cardano, com'è noto, si occupò con un certo successo di matematica e Giovambattista della Porta detiene un posto non del tutto trascurabile nella storia dell'ottica. I calcoli di molti astrologi sono assai meno discutibili delle divagazioni matematiche di Hobbes e Paracelso è

assai meno «scolastico» di Cartesio. Sfogliare con umiltà il gran libro della natura voleva dire, per Bacone, rinunciare a costruire, su basi concettuali e sperimentali troppo fragili, interi sistemi di filosofia naturale. Francesco Patrizi e Pietro Soerensen (o Severinus), Bernardino Telesio, Giordano Bruno, Tommaso Campanella, William Gilbert erano apparsi a Bacone come filosofi che salgono l'uno dopo l'altro sulla scena e «si fabbricano ad arbitrio i soggetti dei loro mondi, come se si trattasse di favole». Una valutazione diversa veniva data dell'opera del medico veronese Girolamo Fracastoro (1483-1553) che veniva ricordato da Bacone come un uomo che non ebbe la pretesa di fondare una nuova filosofia (e questo, nel contesto baconiano, suona come un elogio) e che dette prova di «onesta libertà di giudizio». Non è difficile rendersi conto delle ragioni di questa diversità di toni. Nel *De sympathia et antipathia rerum* (1546) Fracastoro aveva affrontato una serie di temi consueti (perché l'ago magnetico si volge al Nord, perché il pesce remora può fermare le imbarcazioni ecc.) ma aveva concepito la sua ricerca sul «consenso e dissenso» fra le cose come il necessario preliminare ad uno studio dei contagi. Quest'ultimo è stato finora interpretato come la manifestazione di una virtù occulta. Invece di indagare sui principi del contagio, sui modi in cui esso si manifesta, sulla diversa gravità delle malattie contagiose, sulla differenza fra malattie contagiose ed avvelenamenti, ci si è accontentati di richiamarsi a cause misteriose. Ciò dipende dal fatto che i filosofi si sono finora dedicati alle «cause universalissime» e hanno trascurato lo studio delle «cause particolari e determinate» (1574, 57-76). Per spiegare la «simpatia» è necessario sostituire al concetto di una misteriosa *natura* dei corpi, quello di una *forza*. Sulla base di questa sostituzione è impossibile fare ancora uso della teoria aristotelica. Richiamandosi a Democrito, Epicuro, Lucrezio, Fracastoro considera accettabile la teoria che pone nelle *effluxiones* dei corpi il principio dell'attrazione. Dalla reciproca trasmissione di corpuscoli dal corpo A al corpo B dipende l'attrazione di due corpi. L'insieme di questi corpuscoli forma un tutto unitario che è però difforme nelle sue parti: le particelle che sono accanto ai due corpi e quelle che sono collocate fra i due corpi non hanno la stessa densità e rarefazione. Nella «nube di atomi» si producono quindi movimenti che tendono a realizzare l'equilibrio o il massimo consenso delle parti con il tutto. Questi moti di assestamento determinano il movimento dei due corpi l'uno verso l'altro e, in qualche caso, la loro unione.

Nel capitolo VI del *De contagionibus et contagiosis morbis* (1546) Fracastoro affermava che «la causa dei contagi che avvengono a distanza non può essere ricondotta a proprietà occulte» (1574, 77-110): alcuni contagi avvengono per semplice contatto (scabbia, lebbra); altri si trasmettono mediante veicoli, come vestiti o lenzuola; altri infine (come nel caso della

peste e del vaiolo) si propagano a distanza attraverso *seminaria* invisibili. La presa di distanza di Fracastoro (del quale è anche da ricordare il celebre poema in versi latini *Syphilis sive de morbo gallico*, 1530) dall'occultismo risulta evidente anche nell'opuscolo *De causis criticorum diebus*. I giorni critici o le «crisi» delle malattie cadono senza dubbio in giorni determinati. Non si possono però stabilire quei giorni né sulla base di rigide corrispondenze numeriche (come fanno i «filosofi pitagorici») né in base ad una relazione di causa-effetto con il moto dei pianeti (come fanno gli astrologi). I medici hanno avuto il torto di non aver svolto, su questi argomenti, una paziente ricerca sperimentale e «di essersi lasciati sedurre dalle opinioni degli astrologi» (1574, 48-56). Nel primo capitolo della *Exercitatio anatomica de motu cordis* (1628) William Harvey farà positivo riferimento a questa polemica contro le qualità occulte.

All'interno del più generale contesto filosofico della solidarietà fra le cose, della simpatia e antipatia si affacciavano dunque posizioni differenti. Di quelle nozioni si potevano fare *usi* diversi, collegandole ad una visione mistica della realtà o servendosene come di criteri o ipotesi per un'indagine «sperimentale» sulla natura. Anche di fronte a un libro come il *De magnete magneticisque corporibus et de magno magnete Tellure physiologia nova* pubblicato a Londra nel 1600 dal medico inglese William Gilbert (1540-1603) è davvero difficile (anche volendo ammettere che la domanda abbia senso) rispondere al quesito se si tratti dell'ultima opera della magia naturale del Rinascimento o di una delle prime opere della moderna scienza sperimentale. Entrambe queste espressioni sono state usate in riferimento a quel libro il cui primo capitolo è una bibliografia ragionata di libri di magia naturale. La scienza di Gilbert non ha nulla a che fare né con la matematica e i suoi metodi né con la meccanica in senso galileiano. Il suo libro non contiene misurazioni e gli esperimenti che egli compie sono tipicamente qualitativi. Non usa, nella sostanza, un metodo molto diverso da quello di Giambattista della Porta anche se l'ingegnosità degli esperimenti, la ricchezza dei loro dettagli, la cura con cui li esegue sono indubbiamente maggiori. Anche i fini che si pone non sono diversi da quelli dei trattatisti del suo tempo: indagare sulle «cause nascoste» e sui «segreti delle cose», sulla «nobile sostanza del Grande Magnete» e sulle proprietà medicinali della magnetite. Alle «opinioni e alle supposizioni probabili esposte dai professori di filosofia», Gilbert preferisce gli «esperimenti degni di fede e gli argomenti dimostrati». Su queste basi delinea una trattazione sperimentale delle proprietà magnetiche fondamentali la quale (ove si prescinda dai concetti di forza di un campo magnetico e di linee di forza, e dalla formulazione matematica) «non differisce sostanzialmente dalla discussione che all'argomento viene dedicata nei moderni manuali elementari di fisica» (Dijkster-

huis 1971, 526). Data la sua diffidenza per i «professori», Gilbert utilizza il libro sulla declinazione dell'ago magnetico che era stato pubblicato a Londra, nel 1581, da un marinaio inglese che si era dedicato alla costruzione di bussole. Il libro di Robert Norman (*fl.*ca. 1560-1596) era nato sul terreno della pratica ed era uno di quei lavori che rimanevano in genere del tutto estranei al mondo dei dotti. Era intitolato *The new attractive, containing a short discourse of the Magnet or Lodestone* (La nuova attrazione, che contiene un breve discorso sulla Calamita o Magnete).

L'incontro con la pratica dei «meccanici» non era, come vedremo (cfr. cap. III), senza significato. Gilbert tentò di servirsi della misurazione della inclinazione dell'ago magnetico (con l'aiuto di una complicata carta e di un quadrante) per stabilire la latitudine in mare. Ai suoi occhi questa applicazione era una grande scoperta che avrebbe dovuto consentire «con poco sforzo e con un piccolo strumento» di stabilire la latitudine anche con tempo nuvoloso. Nei suoi esperimenti Gilbert fa uso di *terrelle* o *microterre* o calamite globulari. La prima conclusione cui giunge è che la Terra è essa stessa una calamita. Come l'ago di una bussola ha una direzione costante, allo stesso modo è invariabile l'asse della Terra. Gilbert accetta il moto diurno della Terra, ma non è affatto disposto a seguire Copernico nella sua tesi di una rotazione annua della Terra attorno al Sole. Una seconda importante conclusione di Gilbert è la netta distinzione che egli compie fra azione magnetica ed azione elettrica (introduce il termine *Vis electrica* destinato a singolare fortuna). Il magnetismo (l'attrazione che la magnetite esercita sul ferro) gli appare come una *coitio* o un avvicinarsi reciproco che modifica la sostanza dei corpi; l'elettricità (ma questo termine non compare mai nei suoi scritti) come una *attrazione* che tutti i corpi piccoli e leggeri subiscono da parte di oggetti (come l'ambra, il giaietto, il vetro, la resina e lo zolfo) precedentemente strofinati. Il *versorium* da lui costruito era un vero e proprio elettroscopio.

Agli accurati e ingegnosi esperimenti di Gilbert fa da sfondo una visione magico-vitalistica. L'attrazione elettrica si esercita attraverso *effluvia materiali*; quella magnetica (che non è impedita dalla interposizione di corpi materiali) è invece una forza spirituale, l'azione di una *forma* (non in senso aristotelico) che è «unica e peculiare», che è «primitiva, radicale, astrale», che è «in ogni globo, il Sole, la Luna, le Stelle» e che è, sulla Terra, «quella vera potenza magnetica che chiamiamo energia primaria». La calamita possiede un'anima che è addirittura superiore a quella dell'uomo. La Terra è la *mater communis* nel cui utero si formano i metalli. L'intero mondo è animato e «tutti i globi, tutte le stelle e anche questa gloriosa Terra sono stati fin dall'inizio governati dalle loro proprie anime e da esse hanno derivato l'impulso all'autoconservazione». Aristotele ha il torto di aver attribuito

un'anima ai corpi celesti e di non averla poi attribuita alla Terra: «Lo stato delle stelle in confronto alla Terra sarebbe penoso se l'eccellenza dell'anima venisse negata alle stelle e attribuita invece ai vermi, alle formiche, agli scarafaggi, alle erbe» (1958, 321-323, 328).

6. *L'uguaglianza delle intelligenze.*

«L'ardore della gente nell'aprire scuole» sembrava a Jan Amos Komensky (latinizzato in Comenius, 1592-1670), intorno agli anni Trenta del Seicento, una delle caratteristiche dei tempi nuovi. Da quell'ardore derivava «il grande moltiplicarsi dei libri in tutte le lingue, affinché anche i bambini e le donne acquistino familiarità con essi» (1974, 491). La battaglia in favore di un *sapere universale*, comprensibile a tutti perché a tutti comunicabile, era destinata a passare, già nel corso del Seicento, dal piano delle idee e dei progetti degli intellettuali a quello delle istituzioni e delle accademie scientifiche. I membri della Royal Society, nelle parole di Thomas Sprat che ne scrisse la storia, «hanno cercato di effettuare la riforma della filosofia non mediante solennità di leggi o ostentazione di cerimonie, ma mediante una solida pratica, non attraverso una gloriosa pompa di parole, ma attraverso i silenziosi e irrefutabili argomenti delle produzioni reali» (1667, 62-63). L'ideale baconiano della scienza, l'etica della ricerca scientifica proposta da Bacone divennero lentamente patrimonio comune. A Bacone guardarono, come al fondatore di un'epoca nuova, non solo Comenio e, in Inghilterra, Thomas Sprat, Robert Hooke e Newton, ma anche, sul continente, Cartesio e Gassendi e Mersenne.

Alcune convinzioni sulle fonti e sui procedimenti del conoscere, sulla natura umana, sulle vie di accesso alla verità si fanno strada da più parti e vengono espresse con una radicalità che può apparire sconcertante solo a quegli storici che hanno sottovalutato il peso esercitato sulla cultura (anche su quella scientifica) dal naturalismo magico. Quelle convinzioni nascono all'interno di prospettive diverse, hanno anche, in più casi, significati diversi, ma, indipendentemente dalle loro origini, contribuiscono all'affermarsi e al consolidarsi di un'immagine del sapere che è in grado di contrastare con efficacia la tradizione magico-alchimistica, di porsi come *un'alternativa* rispetto ad essa, di esercitare più tardi una funzione egemonica sulle varie forme e manifestazioni della cultura. Le tre idee che sono al centro della nuova immagine del sapere sono: 1) Per accedere alla scienza e alla verità non è affatto necessario disprezzare quella parte della natura umana che è «soltanto umana», né è necessario appartenere al novero degli eletti e degli illuminati: basta la pura e semplice appartenenza alla specie umana; 2) I procedimenti di accesso alla verità o i *metodi* non sono complicati, ma

«modesti», o «semplici», o «umili». Possono essere esposti facendo uso di un linguaggio assai chiaro e proprio per questo sono — in linea di principio se non in linea di fatto — accessibili a tutti; 3) Tutti gli uomini possono, di conseguenza, accedere al sapere e alla verità. Il sapere non è che esplicitazione di possibilità che sono in tutti gli uomini. La scienza (come diranno Arnauld e Nicole negli *Éléments de géométrie*) consiste solo «nel portare più avanti quello che sappiamo naturalmente» (*Oeuvres*, XLII, 215).

Le verità che sono chiamate nozioni comuni — scrive René Descartes (1596-1650) nei *Principia philosophiae* (1644) sono tali da essere conosciute da molti con chiarezza e distinzione. In alcune persone tali verità non risultano abbastanza evidenti, ma ciò non dipende in alcun modo dal fatto «che la facoltà di conoscere che è in alcuni uomini si estenda di più di quella che è comunemente in tutti». Dipende solo dai pregiudizi acquisiti nell'infanzia e dai quali è molto difficile liberarsi. È appena il caso di richiamare il celebre inizio del *Discours sur la méthode* (1637) che afferma essere il buon senso «la cosa del mondo meglio ripartita». La facoltà di distinguere il vero dal falso è uguale per natura in tutti gli uomini. La differenza nelle opinioni «non deriva dal fatto che alcuni siano più ragionevoli di altri», ma solo dal fatto che si seguono vie diverse e non si considerano le stesse cose. Per quanto lo riguarda, Cartesio «non ha mai presunto che la sua intelligenza fosse in nulla più perfetta del comune», afferma che le opinioni nuove presenti nei suoi scritti sono «semplici e conformi al senso comune». Il metodo nuovo viene presentato come un insieme di regole «certe e facili». La dottrina che espone le regole per la guida dell'intelligenza, d'altra parte, non va velata e ricoperta «per tenere lontano il volgo», ma adornata e rivestita in modo «da riuscire gradita all'umana intelligenza». Dato il legame che sussiste fra le conoscenze, ove si inizi dalle più semplici e si proceda come di gradino in gradino, «non occorre avere molta destrezza e capacità per ritrovarle». L'esposizione del metodo deve procedere per una serie di ragioni «chiare e comuni» e le verità raggiunte «avranno corso nel mondo allo stesso modo della moneta la quale non è di minor valore quando viene fuori dalla borsa di un contadino». Il processo della conoscenza deve partire «dalle cose più semplici e facili a conoscersi». È un dato di fatto che molti uomini non si dedicano alla ricerca della saggezza: ciò dipende solo dal fatto che essi «non sperano di riuscirvi» e «non sanno quanto ne sono capaci» (*Opere*, I, 26-28, 46).

Mentre contrappone la sua filosofia a quella «attraverso la quale si fanno le pietre filosofali», Thomas Hobbes (1588-1679) afferma che «la filosofia, cioè la ragione naturale, è innata in ogni uomo» e che la ragione «non è meno naturale della passione ed è la medesima in tutti gli uomini». I pochi e primi elementi della filosofia sono i «semi» dai quali potrà svilupparsi una filosofia

vera. Quei semi o primi fondamenti gli appaiono «umili, aridi, quasi deformi». Rivolgendosi all'amico lettore, scrive che la filosofia «è figlia della tua mente, è ancora informe in te stesso». Il metodo che Hobbes ha costruito è costruito per tutti gli uomini: «se ti piacerà, potrai usarlo anche tu».

Proprio in Marin Mersenne (1588-1648), instancabile «segretario dell'Europa colta», che fu in corrispondenza con tutti gli scienziati e gli eruditi del suo tempo, troviamo espressa in forma singolarmente efficace questa idea — che è radicalmente anti-magica e anti-occultistica — della eguaglianza delle intelligenze: «Un uomo non può fare nulla che un altro uomo non possa egualmente fare e ciascun uomo contiene in sé tutto ciò che è necessario per filosofare e ragionare di tutte le cose». Nelle *Quaestiones in Genesim* (1623), Mersenne aveva colpito alle radici i nuclei teorici che erano alla base del platonismo ficiniano e della concezione magica del mondo: il rapporto fra le idee platoniche e le immagini delle stelle, i poteri attribuiti alle immagini, la dottrina delle virtù delle piante e delle pietre, la teoria dell'*anima mundi* e quella dello *spiritus mundi*, l'animismo universale, la connessione tra cabala e cosmologia. Ficino, Agrippa, Tritemio, Francesco Giorgio, Bruno, Patrizi, Campanella, tutti i grandi esponenti del pensiero magico vengono respinti e condannati come impostori. È vero che si possono trasformare le sostanze? Perché allora gli alchimisti non fondano una Accademia nella quale «senza più misteri né arcani» si possano studiare i risultati dei loro esperimenti?

Non è certo un caso che la polemica contro le oscurità della magia, contro le pretese illusorie degli alchimisti, contro gli inganni dell'astrologia, sia presente in tutti gli autori che possono, a vario titolo, essere annoverati fra gli esponenti della rivoluzione scientifica del Seicento. Non dobbiamo pensare solo al silenzio sdegnoso di Descartes o di Galilei, alla violenza aggressiva di Bacone, alle prese di posizione di Gassendi contro Robert Fludd, alla lunga battaglia di Mersenne contro gli occultisti, alle ironie di Robert Boyle sui seguaci di Paracelso. Troviamo presente quella polemica anche negli autori più saldamente collegati alla tradizione del magismo e dell'ermetismo. Keplero contrappone a coloro «che si dilettano nei tenebrosi enigmi delle cose» lo sforzo di «portare alla chiarezza dell'intelletto le cose avvolte nell'oscurità». Non desidera e non vuole l'alleanza di Robert Fludd, così come Galilei non desidera e non vuole la appassionata «difesa» di Tommaso Campanella. Anche il vitalista e animista Gilbert è, su questo punto, assai chiaro: la nostra generazione, afferma, ha prodotto molti volumi intorno alle meraviglie della natura «e alle loro cause recondite, astruse ed occulte». In ciascuno di quei volumi, continua, «si parla dell'ambra che attira le pagliuzze, ma in quei volumi non troverete mai una prova ricavata da esperimenti, né una dimostrazione: gli autori si occupano dell'argomento in

modo tale da avvolgerlo in una profonda oscurità trattandolo in modi esoterici, miracolosi, astrusi, reconditi e mistici».

Nei primi decenni del Seicento si andò formando in Europa un'immagine della scienza e del filosofo naturale (la parola *scienziato* è un termine coniato nell'Ottocento) che avrà nei secoli successivi, nel bene e nel male, effetti decisivi. Il nuovo ritratto dell'uomo di scienza che fu allora elaborato era profondamente diverso da quello dell'antico filosofo o sapiente, così come da quello del santo, del monaco, del professore universitario, del gentiluomo di corte, del perfetto principe, dell'artigiano, dell'umanista, del mago. I fini che furono teorizzati da quei compositi gruppi intellettuali che contribuirono allo sviluppo del sapere scientifico nel secolo XVII, i valori che essi proposero furono senza dubbio molto diversi — senza dubbio più impersonali — di quelli della santità individuale, della immortalità letteraria, dell'autocompiacimento per la propria demoniaca personalità eccezionale.

Accanto alle molte e diverse teorie del metodo scientifico era nata anche un'immagine del dotto che si contrapponeva radicalmente all'altra immagine presente nei testi della magia, del sapiente come sacerdote o come eletto. Questa nuova immagine trova immediati riflessi anche sul piano del costume intellettuale. Il «sapiente giunto da lontano» che parla ai dotti e agli uomini politici riuniti in assemblea nella *Redargutio philosophiarum* di Bacone non parla da una tribuna o da una cattedra, ma si intrattiene familiarmente con gli astanti. Il suo discorso appare «più vicino al candore che alla presunzione». Lo stile della discussione fra i protagonisti della cartesiana *Recherche de la vérité* non ha nulla di solenne e di iniziatico: «è quello delle oneste conversazioni, dove ognuno manifesta familiarmente agli amici ciò che ha di meglio nel suo pensiero». A questo tono di familiare conversazione si richiamano Salviati e Sagredo che combattono per la nuova scienza nel *Dialogo* galileiano.

Gli esponenti della nuova cultura avevano elaborato, in contrapposizione alla cultura ermetica, una nuova immagine dell'intellettuale e dei suoi rapporti con gli altri uomini. Il rapporto fra i sapienti e il volgo era cambiato per sempre: non solo sul piano delle idee, ma anche e ben presto su quello delle istituzioni. Nel momento in cui si vanno stabilendo «canoni pubblici per la metodologia» (o se ne afferma comunque l'esigenza) la scienza moderna tende a configurarsi come una pratica sociale nella quale «le innovazioni vengono istituzionalizzate» e si stabiliscono e si rafforzano tecniche sempre più elastiche e raffinate di informazione e di controllo.

BIBLIOGRAFIA

Testi

C. AGRIPPA, *Opera omnia*, Lione, 1550 ca., 2 voll.
ID., *Della vanità delle scienze* (1527), Venezia, 1659.
ID., *Testi scelti*, a cura di P. Zambelli, in *Testi Umanistici sull'Ermetismo*, Roma, Archivio di Filosofia, 1955.
A. ARNAULD, *Oeuvres complètes*, Paris-Lausanne, 1775-83, 43 voll.
F. BACON, *Scritti filosofici*, a cura di P. Rossi, Torino, UTET, 1975.
P. BONO DA FERRARA, *Introductio in artem chemiae*, Montisbeligardi, 1602.
G. BRUNO, *Dialoghi italiani*, a cura di G. Gentile e G. Aquilecchia, Firenze, Sansoni, 1956.
ID., *Opera latine conscripta*, Napoli-Firenze, 1879-1891.
T. CAMPANELLA, *Del senso delle cose e della magia*, Bari, Laterza, 1925.
G. CARDANO, *Opera omnia*, Lione, 1663, 10 voll.
ID., *Autobiografia*, a cura di P. Franchetti, Torino, Einaudi, 1945.
COMENIO, *Opere*, a cura di M. Fattori, Torino, UTET, 1974.
R. DESCARTES, *Opere*, introduzione di E. Garin, Bari, Laterza, 1967, 2 voll.
ID., *Il mondo L'uomo*, a cura di E. Garin, Bari, Laterza, 1969.
W. GILBERT, *De Magnete*, a cura di P.F. Mottelay, New York, Dover, 1958.
PARACELSO, *Sämtliche Werke*, a cura di K. Sudhoff, München-Berlin, 1922 segg., 14 voll.
ID., *Sämtliche Werke*, a cura di K. Goldammer, Wiesbaden, 1955 segg.
Picatrix Latinus, a cura di V. Perrone Compagni, in «Medioevo», I, 1975, pp. 237-337.
G. PICO, *Disputationes adversus astrologiam divinatricem*, a cura di E. Garin, Firenze, Vallecchi, 1952, 3 voll.
TH. SPRAT, *The History of the Royal Society*, London, 1667.
B. TELESIO, *De rerum natura (libri I-II)*, a cura di L. De Franco, Cosenza, Casa del Libro, 1965.
ID., *De rerum natura (libri VII-IX)*, a cura di L. De Franco, Firenze, La Nuova Italia, 1981.

Studi

N. BADALONI, *Tommaso Campanella*, Milano, Feltrinelli, 1965.
S. CAROTI, *L'astrologia in Italia*, Roma, Newton Compton, 1983.
P. COULIANO, *Eros e magia nel Rinascimento*, Milano, Mondadori, 1971.
C CRISCIANI, *La questio de alchimia fra Duecento e Trecento*, in «Medioevo», 2, 1976.
ID., *The conception of alchemy as expressed in «Pretiosa Margarita Novella» of Petrus Bonus of Ferrara*, in «Ambix», 20, 1973, pp. 165-181.
A. DEBUS, *The chemical philosophy*, New York, Watson, 1977.
E.J. DIJKSTERHUIS, *Il meccanicismo e l'immagine del mondo dai presocratici a Newton*, Milano, Feltrinelli, 1971.
E. ELIADE, *The forge and the crucible*, New York, Harper, 1962.
M. FATTORI e M. BIANCHI (a cura di), *Spiritus*, Roma, Edizioni dell'Ateneo, 1984.
E. GARIN, *Medioevo e Rinascimento*, Bari, Laterza, 1954.
ID., *Lo Zodiaco della vita*, Bari, Laterza, 1977.
E.J. HOLMYARD, *Storia dell'alchimia*, Firenze, Sansoni, 1972.
A. INGEGNO, *Saggio sulla filosofia di Cardano*, Firenze, La Nuova Italia, 1980.
TH. LITT, *Les corps célestes dans l'univers de Thomas d'Aquin*, Louvain-Paris, Nauwelaerts, 1963.
P.H. MICHEL, *La cosmologie de G Bruno*, Paris, Hermann, 1962.
C.G. NAUERT, *Agrippa and the crisis of Renaissance thought*, Urbana, University of Illinois Press, 1965.
W. PAGEL, *Paracelsus· an introduction to philosophical medicine in the era of Renaissance*, Basel, 1958.

P. ROSSI, *Francesco Bacone dalla magia alla scienza*, Torino, Einaudi, 1974.
ID., *Immagini della scienza*, Roma, Editori Riuniti, 1977.
M.L. RIGHINI BONELLI e W. SHEA (a cura di), *Reason, experiment and mysticism in the Scientific Revolution*, New York, Watson, 1975.
F.S. TAYLOR, *The Alchemists, founders of modern chemistry*, New York, 1949.
K. THOMAS, *La religione e il declino della magia*, Milano, Mondadori, 1971.
L. THORNDIKE, *The history of magic and experimental science*, New York, Columbia University Press, 1923, 8 voll.
B. VICKERS, *Occult and scientific mentalities in the Renaissance*, Cambridge, Cambridge University Press, 1984.
C. VASOLI (a cura di), *Magia e scienza nella civiltà umanistica*, Bologna, Il Mulino, 1976.
M.L. VON FRANZ, *Alchimia*, Torino, Boringhieri, 1984.
D.P. WALKER, *Spiritual and demonic magic from Ficino to Campanella*, London, 1958.
CH. WEBSTER, *Magia e scienza da Paracelso a Newton*, Bologna, Il Mulino, 1984.
R.S. WESTMAN e J.E. MC GUIRE, *Hermeticism and the Scientific Revolution*, Los Angeles, W.A. Clark Memorial Library, 1977.
F.A. YATES, *Giordano Bruno e la tradizione ermetica*, Bari, Laterza, 1969.
P. ZAMBELLI, *Astrologi hallucinati: stars and the end of the world in Luther's time*, Berlin - New York, Walter de Gruiter, 1986.
ID., *L'immaginazione e il suo potere*, in *Orientalischer Kultur und europäischen Mittelalter*, in *Miscellanea Mediaevalia*, Berlin - New York, De Gruyter, 1985, pp. 188-206.

II. *La «grande arte»: l'algebra nel Rinascimento*
(di UMBERTO BOTTAZZINI)

1. *L'eredità medioevale.*

Nell'autunno del 1496 Nicolaus Kopperlingk di Thorn si metteva in viaggio per l'Italia per completare la sua preparazione scientifica presso lo Studio di Bologna. Qui il giovane Nicolaus, destinato a diventare universalmente noto col nome latinizzato di Copernico (1473-1543), contava di seguire le lezioni di alcuni tra i più reputati dotti del tempo. Allo Studio bolognese Copernico divenne ben presto amico e assistente di Domenico Maria Novara (1454-1504) che «leggeva» astronomia ed era culturalmente legato agli esponenti degli ambienti neoplatonici fiorentini, che avevano tradotto i testi di Proclo e ne abbracciavano la concezione mistica della matematica, da cui facevano derivare la perfezione della struttura dell'universo. Abile osservatore, Novara aveva rilevato dai suoi dati sperimentali fatti che confutavano l'opinione largamente diffusa dell'immutabilità del sistema celeste, accreditata dall'autorità di Tolomeo. Le sue ardite congetture, basate sul mutamento di direzione dell'asse terrestre e sulla diminuzione della massima declinazione del sole, dovevano trovare conferma di lì a pochi anni nei lavori del suo giovane assistente.

Insieme a Novara, Copernico dovette frequentare tra i lettori dello Studio bolognese uomini destinati a lasciare il proprio nome nella storia della matematica. Nello stesso anno in cui egli era arrivato a Bologna vi iniziava a «leggere» aritmetica e geometria il figlio di un cartolaro della città, Scipion dal Ferro (1465-1526), mentre alla fine del suo soggiorno bolognese, nel 1500, troviamo nei rotuli dei lettori dell'università il nome di un celebre

«mathematico» e maestro d'abaco del tempo, frate Luca Pacioli di Borgo S. Sepolcro (1445?-1514?). Luca Pacioli e Scipion dal Ferro, lettori contemporanei nello stesso Studio, rappresentano emblematicamente il passaggio dalla matematica classica, arricchita della tradizione medioevale, alla nuova scienza dell'algebra cinquecentesca. Pacioli raccolse l'eredità degli abacisti medioevali, gli uomini capaci di calcolare colle «figure degli Indi», come allora si chiamavano le cifre arabe, gli abili consulenti dei mercanti, esperti di cambi e percentuali, che tenevano bottega nelle piazze delle città italiane. Scipione, il geniale figlio del cartolaro bolognese, si spingerà invece oltre i confini della matematica classica trovando la soluzione delle equazioni algebriche di terzo grado, e diventerà il primo dei maestri nella «grande arte», come (con legittimo orgoglio) Cardano chiamerà poi l'algebra del Cinquecento.

Frate Luca Pacioli aveva trascorso lunghi anni a Venezia in casa Rompiasi, mercante alla Giudecca, insegnando le regole dell'abaco, i canoni dell'«algoritsmo» e i rudimenti della geometria euclidea ai figli del mercante, prima di trasferirsi per qualche tempo a Roma e vestire poi il saio francescano.

A Roma Pacioli fu ospite di Leon Battista Alberti (1404-1472), che godeva fama anche di matematico per certi suoi *Ludi mathematici*, una raccolta di problemi e quesiti elementari che non sembra però sufficiente a giustificare l'elogio che gli tributò un poeta fiorentino scrivendo: «Nec minor Euclide est Albertus, vincit et ipsum / Vitruvium...» (in Cantor 1900, 293), pensando forse piuttosto al suo trattato sull'architettura.

Adempiendo a suo dire alle direttive impostegli dall'ordine monastico, ma certo soddisfacendo il suo inquieto spirito in cerca di conferme e di successi, frate Luca insegnò la propria arte errabondo per città e corti, a Perugia e a Firenze, a Milano e Napoli, a Bologna e ancora a Venezia. Conobbe Piero, il maestro della prospettiva, anch'egli nativo, come Pacioli, di Borgo S. Sepolcro, «el monarcha ali dì nostri della pittura e architectura», come lo definì lo stesso frate Luca.

Competente di geometria teorica, Piero della Francesca (1406-1492) aveva scritto un'opera sui poliedri regolari, il *De quinque corporibus regularibus* dedicato al Duca di Montefeltro, mentre un suo trattato di chiarificazione delle basi teoriche delle nuove tecniche prospettiche, il *De perspectiva pingendi*, girava manoscritto per le botteghe dei pittori toscani. A conferma del vasto interesse che le nuove tecniche di calcolo col sistema posizionale e le cifre arabe allora riscuotevano presso gli uomini colti, artigiani e artisti, sta il *Trattato d'abaco* redatto dallo stesso Piero. In esso il grande pittore dimostrava sicura maestria nel maneggiare i capitoli della nuova arte e rivelava una certa originalità e abilità di calcolo fornendo

formule di risoluzione mediante radicali per particolari equazioni di 5° grado del tipo $h(1+x)^5=k$ legate a problemi di calcolo degli interessi di una certa somma maturati in cinque anni.

Alla corte degli Sforza, a Milano, frate Luca strinse una solida amicizia con Leonardo (1452-1519), che gli illustrò di magnifiche tavole il trattato *La divina proportione*, apparso a stampa nel 1509. Pacioli riprendeva qui i temi classici della scienza greca sull'armonia delle figure geometriche e, nella seconda sezione del trattato, riproduceva in volgare l'opera di Piero sui corpi regolari. Forse all'amicizia con frate Luca non furono estranee le riflessioni di Leonardo, «omo sanza lettere» come amava definirsi egli stesso, sul ruolo della matematica nella ricerca scientifica e forse dagli scritti di Pacioli l'artista toscano ricavò suggestioni allo studio di Archimede.

Nel 1494 infatti, Luca Pacioli aveva dato alle stampe a Venezia la sua grande opera *Summa de arithmetica, geometria, proportioni et proportionalità* che, per essere stampata e quindi di relativamente facile reperibilità, «non solo era appunto quella che i bisogni culturali del tempo richiedevano, ma fu anche quella che a tali bisogni seppe compiutamente soddisfare» (Cantor 1900, 336). Pacioli non fu pensatore originale, ma piuttosto un abile e informato espositore di tecniche e risultati noti. Nelle pagine della *Summa* raccolse quanto nel campo dell'aritmetica, dell'algebra e della geometria (e delle loro diverse e svariate applicazioni) si andava allora insegnando nelle università e nelle botteghe d'abaco italiane.

Oltre che dei risultati consolidati nella pratica degli abacisti e delle traduzioni dei classici greci disponibili frate Luca si servì massicciamente, nel compilare la *Summa*, dei lavori di Leonardo Pisano (1170?-1240?), il celebre Fibonacci che all'inizio del Duecento col *Liber abaci* (1202) aveva introdotto nella cultura italiana l'uso delle cifre arabe e della notazione posizionale, ben presto affermatosi nella pratica mercantile. Il geniale matematico pisano era stato inoltre autore di un difficile e profondo libro sulla teoria dei numeri e l'analisi indeterminata, il *Liber quadratorum* (1225), e di un'opera di carattere essenzialmente didattico, la *Practica geometriae* (1220), largamente ispirata agli *Elementi* di Euclide e alla tradizione della geometria greca classica di Archimede, Tolomeo ed Erone.

Nel lungo intervallo di quasi tre secoli che separa l'opera di Fibonacci dalla *Summa* di Pacioli la matematica aveva attraversato una stagione certo non ricca di risultati straordinari (come quella che si aprirà col nuovo secolo), ma sicuramente non opaca e senza interesse come talvolta si legge o si è portati a pensare. Nelle università medioevali l'insegnamento della matematica, compresa nelle cosiddette arti liberali, non si spingeva in generale molto oltre i primi rudimenti della geometria euclidea, ma numerosi erano stati i dotti traduttori e commentatori dei testi arabi di Euclide, così come i logici e

i filosofi che avevano avanzato ardite speculazioni di carattere matematico. Nel Trecento avevano trovato larga eco le idee dei «fisici parigini» e le intuizioni del loro esponente più autorevole, Nicola d'Oresme (1323?-1382?), sulla diversa natura dell'infinito attuale e potenziale. Dal suo trattato *De latitudinibus formarum*, un'opera che conobbe diverse edizioni a stampa tra la fine del Quattrocento e l'inizio del Cinquecento, filosofi e matematici ricavarono suggestioni per l'analisi quantitativa dei fenomeni, per una ricerca che li riconducesse allo studio di figure geometriche, forse remota intuizione della fecondità dell'uso di coordinate per rappresentare l'andamento di fenomeni variabili. Lettori e commentatori nelle principali università europee ebbe anche il *Liber calculationum* dei logici di Oxford, che svilupparono le idee di Thomas Bradwardine (1290?-1349) tra cui quella, che si trova anche in Oresme, di introdurre nel calcolo potenze ad esponente frazionario, mentre in Italia Nicola da Cusa (1401-1464) esponeva allo Studio di Padova, nelle sue lezioni di filosofia, matematica ed astronomia, le sue penetranti intuizioni sull'infinito.

D'altro lato, di fronte ad un interesse esclusivamente teorico e speculativo nei confronti della matematica, quale era quello degli studiosi dei testi di filosofia e dei dotti che «leggevano» nelle università, si venne affermando nel corso del Medioevo una tendenza di origine pratico-calcolistica, che, nelle mani dei maestri d'abaco italiani, si sviluppò in ricerche algebriche di carattere spesso assai originale, che annunciavano i successi degli algebristi del Cinquecento nella risoluzione di equazioni di grado superiore al secondo.

Mentre nel *Liber abaci* Leonardo Pisano si era limitato a discutere geometricamente equazioni di secondo grado, numerosi erano infatti i trattati medioevali nei quali gli abacisti si spingevano ad affrontare problemi più difficili, che portavano ad equazioni di terzo e quarto grado e talvolta (come abbiamo visto nel caso di Piero della Francesca) anche di quinto grado. Nel suo *Libro di ragioni* del 1328 il maestro Paolo Gherardi forniva una prima classificazione dei vari casi sotto cui si presentano le equazioni di terzo grado quando si vogliono evitare, come egli intendeva fare, i numeri negativi. È vero che, illustrando i vari casi con esempi numerici, egli forniva poi formule non corrette di risoluzione per radicali, ma nell'*Aliabraa argibra*, un trattato manoscritto del XIV secolo attribuito a tale Dardi, abacista pisano, si trovano formule risolutive corrette per particolari classi di equazioni di terzo e quarto grado.

Una trattazione approfondita di equazioni di grado superiore al secondo — ma ad esso riconducibili — si legge nelle carte manoscritte della *Praticha d'arismetrica* (1463) di un certo maestro Benedetto da Firenze, che raccolse nella sua vasta opera numerosissime «ragioni» di precedenti maestri, fornendo così anche una prima traccia per la storia (ancora oggi estrema-

mente incompleta) degli sviluppi dell'algebra medioevale. Con particolare considerazione maestro Benedetto ricordava nelle carte della sua *Praticha* la figura di Antonio de' Mazzinghi, abacista che teneva bottega a Santa Trinita a Firenze, stimato dai contemporanei assai esperto «non solamente in arismetrica et geometria, ma in astrologia, musicha ancora, in edificare, in prospettiva, in tutte l'arte di grande intelletto».

Allievo di uno dei più celebri maestri del Trecento, Paolo dell'Abaco (1282?-1372?), l'«arismetra» e astrologo Antonio, ricordato nei suoi versi dal Sacchetti, fu autore di una raccolta di «ragioni», i *Fioretti*, nei quali, con i metodi dell'algebra retorica, affrontava problemi che (tradotti in simbolismo moderno) portano a sistemi di equazioni di secondo grado in tre o quattro incognite, che egli risolveva con procedure analoghe a quelle odierne e, talvolta, con ingegnosi artifici.

Pur lontana dalla profondità di pensiero degli scritti di Leonardo Pisano, né dotata degli elementi di originalità presenti nei trattati dei migliori abacisti — o nella più recente *Triparty en la science des nombres* del 1484, l'opera rimasta manoscritta del medico e matematico parigino Nicolas Chuquet (1445?-1500?) — la *Summa* di frate Luca Pacioli si presentava come un monumentale corpo di conoscenze che aveva ben presto fatto dimenticare la prima opera a stampa di carattere matematico, l'*Aritmetica di Treviso*, un anonimo opuscolo scritto per agevolare i conti dei mercanti, apparso nel 1478.

Com'era usuale nei trattati d'abaco, nelle prime *Distinzioni* — le suddivisioni di cui si compongono le due parti principali della *Summa*, la prima dedicata all'aritmetica e all'algebra, la seconda alla geometria — frate Luca introduceva le cifre arabe e le operazioni con esse, l'addizione, la sottrazione e le diverse maniere di moltiplicare due numeri che venivano insegnate dagli abacisti delle varie città, il metodo *per biricuocoli* come si diceva a Firenze o *a scacheri* secondo l'usanza veneziana, quello *a castelluccio*, *a crocetta* o l'infallibile metodo *a gelosia*; metodi tutti dimenticati oggi di fronte alla pratica invalsa di «mettere in colonna», ma dotati ciascuno di una propria peculiarità. Analogamente, nel presentare la divisione, Pacioli introduceva con esempi numerici i vari modi allora comunemente in uso, quello detto *a danda* e quello *a tavoletta*, *a ripiego* e *a galera*.

Pacioli trattava poi dei rapporti e delle proporzioni, presentando proporzioni «mirabili» e regole «notabili» quale quella della falsa posizione e quella di «El cataym», cioè delle «doi false positioni», prima di arrivare «al luogo molto desiderato: cioe ala madre de tutti li casi detta dal vulgo la regola della cosa over Arte magiore cioe pratica speculativa, altramente chiamata Algebra et almucabala in lingua arabica over caldea» (in Cantor 1900, 321).

Qui frate Luca insegnava la regola dei segni nelle operazioni aritmetiche

con numeri relativi e, basandosi sul libro X degli *Elementi* di Euclide, le operazioni con gli irrazionali e le trasformazioni di radici «legate» come $\sqrt{a \pm \sqrt{b}}$ in somma algebrica di due radicali $\sqrt{u} \pm \sqrt{v}$ (sotto l'ipotesi che $a^2 - b$ sia un quadrato). Infine egli esponeva la teoria delle equazioni di primo e secondo grado e ancora, come in altri trattati d'abaco, di quelle biquadratiche della forma $x^{2n} + px^n + q = 0$, «proportionali» a quelle di secondo grado poiché «proportionaliter infinite altre si possono formare» e risolvere con lo stesso metodo delle equazioni di secondo grado. Ma di fronte ad un esempio di un'equazione che oltre alla x^4 e alla x^2 contiene anche la «cosa» incognita x al primo grado, Pacioli non arrischiava formule risolutive per radicali — pur scorrette come aveva fatto Gherardi — ma scriveva semplicemente «impossibile», così come impossibili erano i casi di equazioni di terzo grado, per cui «non s'è possuto finora troppo bene formare regola generale, per la disproportionalità tra loro ... e però ancora degli agguagliamenti loro non se pò dar regola generale, ... e però quando in li toi agguagliamenti te ritrovi termini di diversi intervalli, fra loro disproportionati, dirai che l'arte ancora a tal caso non ha dato modo, si come ancora non è dato modo al quadrare del cerchio» (in Bortolotti 1947, 30).

Una vasta rassegna di problemi tratti dalla pratica della mercatura e dei cambi, seguita dalla discussione sulla tenuta dei libri mastri e dalla presentazione delle unità di peso, misura e denaro in uso nei vari stati e delle equivalenze tra esse chiude la prima parte principale della *Summa*. La seconda parte, dedicata ad argomenti geometrici, è completamente ispirata alla *Practica geometriae* di Leonardo e, analogamente alla prima, si conclude con un'ampia raccolta di problemi, sia puramente geometrici (come quello di iscrivere in un triangolo isoscele dato tre cerchi uguali e tangenti fra loro, ognuno dei quali tocchi due lati del triangolo) sia problemi relativi all'architettura o all'astronomia, alla statica, all'ottica o alla pratica della navigazione.

«Malgrado le doti indiscutibili che possiede quest'opera — ha osservato lo storico della matematica G. Loria commentando la *Summa* di Pacioli — essa è documento inoppugnabile del fatto che, nei tre secoli intercorsi fra Leonardo e Luca, la nostra scienza non compì alcun reale progresso» (Loria 1950, 282). L'opinione di Loria, che riflette una convinzione a lungo diffusa tra gli storici, appare sempre meno condivisibile di fronte ad uno studio sempre più accurato dei manoscritti degli abacisti medioevali, che rivelano forti elementi di originalità nel campo dell'algebra spesso trascurati o incompresi da frate Luca. In realtà, le pagine a stampa della *Summa* assicuravano un'eco duratura a tecniche e risultati elaborati e ripetuti per generazioni, affidati alla tradizione orale o ai manoscritti dei maestri d'abaco.

Accanto a quella di Pacioli, grande diffusione ebbe una analoga *Summa de arithmetica*, stampata a Firenze nel 1521, opera di tal Francesco Ghaligai di cui non si conoscono dati biografici certi. La ristampa della *Summa* di Pacioli nel 1523 confermava comunque la perdurante attualità di quest'opera in volgare come prezioso strumento nelle mani dei protagonisti della vita civile delle città del Rinascimento italiano, di mercanti e banchieri, scienziati e inventori, artigiani autodidatti, artisti.

Lungo le vie percorse dai mercanti, la cultura e le tecniche degli abacisti e dei matematici italiani si diffusero nelle città europee, particolarmente in Germania, che conosceva allora un periodo di grande sviluppo economico. Numerosissimi furono i trattati sull'arte del calcolare, scritti nella maggior parte dei casi a fini immediatamente pratici. Tra quelli più significativi pubblicati in Germania vi fu la *Margarita philosophica* (1503) di Gregor Reisch (?-1523), mentre grandissima fama ebbero le opere di Adam Reise (1492-1559), forse il più celebre dei maestri tedeschi della *Rechnenkunst*, l'arte di calcolare con le cifre arabe. Si tratta tuttavia di opere che non possiedono grande originalità e sono largamente ispirate alla *Summa* di Pacioli.

Alla ricca produzione di manuali d'aritmetica e d'algebra dei primi decenni del Cinquecento tedesco appartiene anche *Die Coss* (termine chiaramente ispirato all'italiano «cosa») di un certo Rudolff, matematico vissuto nella prima metà del secolo, la cui opera principale fu poi riedita da Michel Stifel (1486-1567). Stifel fu figura significativa nel panorama culturale della Germania dell'epoca, percorsa dai movimenti riformatori di Lutero e Melantone, il «praeceptor Germaniae», anch'egli come Stifel professore all'università di Wittemberg. Di Lutero, Stifel fu amico e seguace, mentre Melantone gli scrisse la prefazione alla *Arithmetica integra*, un'opera che si ispirava apertamente a Euclide e ai «cossisti» tedeschi, e che fu pubblicata a Norimberga nel 1544.

Nei tre libri dell'*Arithmetica* di Stifel non compaiono elementi di sostanziale novità rispetto ai trattati del tempo, se si esclude l'uso sistematico dei segni + e − per i numeri relativi (ma i negativi sono ancora considerati numeri «surdi», assurdi), una tabella per la determinazione dei coefficienti numerici delle prime potenze di un binomio e una correlazione tra i termini di una serie aritmetica e una geometrica che ha indotto alcuni commentatori a parlare di una prima intuizione del concetto di logaritmo.

Circa un anno era passato dalla pubblicazione dell'*Arithmetica integra* quando nella stessa Norimberga il medico e matematico milanese Girolamo Cardano (1501-1576) dava alle stampe l'*Ars magna*, il volume che raccoglieva i più recenti risultati teorici degli algebristi italiani e faceva apparire decisamente antiquata non solo l'*Arithmetica* del professore di Wittemberg, ma l'intera scuola «cossica» cui era ispirata.

2. «*Cose e cubi equal numero*».

Nel febbraio del 1535 un certo Antonio Maria Fiore, uomo che «non haveva scientia, ma solamente gran pratica», sfidava in pubblica contesa matematica Nicolò Tartaglia (1499?-1557), lettore di Euclide a Venezia, a risolvere trenta quesiti che, «operando per algebra», portavano ad equazioni di terzo grado, o come allora si diceva, a «cose e cubo equal numero». Nicolò aveva scelto di conservare nei suoi scritti l'inequivoco soprannome di Tartaglia a ricordo di un impedimento nel parlare causatogli da un tremendo fendente alla testa infertogli quand'era ragazzo da un soldato francese durante il sacco della natale Brescia nel 1511. Tartaglia era un matematico autodidatta, che si guadagnava da vivere facendo il consulente dei mastri carpentieri dell'arsenale veneziano e vendendo le proprie scoperte balistiche e invenzioni matematiche a artiglieri e «schiopetari», uomini d'arme e naviganti che affollavano la capitale della repubblica veneta.

Di fronte alla sfida di Fiore, che metteva in gioco la sua reputazione scientifica, Tartaglia rimase dapprima esitante, poiché «frate Luca nella sua opera afferma esser impossibile a risolvere tal capitolo con regola generale». Ma lo stesso Fiore si andava vantando, certo per intimorire l'avversario, che «gia trenta anni tal secreto gli era stato mostrato da un gran mathematico, il che — ci racconta Tartaglia — mi fece dubitar che'l fusse vero, e per questo io posi ogni mio studio, cura e arte per ritrovar regola a tal capitolo e così per bona mia sorte ... la ritrovai» (Tartaglia 1546, 106v).

Con queste parole Tartaglia ricostruiva molti anni dopo le vicende della sua scoperta, pur non potendo rivendicarne la priorità, che andava effettivamente attribuita al «gran mathematico» cui alludeva Anton Maria Fiore, al lettore dello Studio bolognese Scipion dal Ferro, a detta dei contemporanei «huomo rarissimo» nelle scienze matematiche.

La mancanza di documenti lascia spazio solo a congetture sulle modalità della scoperta di Scipione. Può darsi che, a dispetto dell'opinione di Pacioli, la notizia di tentativi infruttuosi da parte di antichi abacisti l'abbia spinto a tentare di risolvere un caso unanimemente ritenuto insolubile. Certo è che dal Ferro non ci ha lasciato testimonianza scritta del successo della sua caparbia sfida, limitandosi a confidare il proprio segreto ad alcuni amici e discepoli. Tra questi c'erano il genero Annibale della Nave, che gli succedette nell'insegnamento allo Studio, probabilmente lo stesso Anton Maria Fiore e Pompeo Bolognetti seniore, lettore «Ad praxim Mathematicae» a Bologna verso la metà del secolo.

In un fascicolo manoscritto che raccoglieva verosimilmente le sue lezioni sulle «Regole principali dell'arte maggiore, detta Regola della Cosa, over d'Algibra» Bolognetti scriveva che il capitolo di cose e cubo eguale a numero

«lui l'hebbe da Messer Sipion dal Ferro vecchio bolognese» ed esponeva poi la regola seguente: «Quando le cose e li cubi si eguagliano al numero [$ax + bx^3 = c$] ridurai la equatione a 1 cubo [$x^3 + px = q$] partendo per la quantità delli cubi [dividendo per il coefficiente di x^3], poi cuba la terza parte delle cose [$p^3/27$], poi quadra la metà del numero [$q^2/4$] e questo suma con il detto cubato [$q^2/4 + p^3/27$], et la radice di deta summa più la metà del numero fa un binomio [$\sqrt{q^2/4 + p^3/27} + q/2$] et la radice cuba di tal binomio, men la radice cuba del suo residuo val la cosa» (in Bortolotti 1947, 43).

Si tratta in conclusione della formula abituale:

$$x = \sqrt[3]{\sqrt{q^2/4 + p^3/27} + q/2} - \sqrt[3]{\sqrt{q^2/4 + p^3/27} - q/2}$$

come appare immediatamente traducendo nel simbolismo a noi familiare le prescrizioni dell'algebra «retorica» di Scipione.

Pur rappresentando un formidabile passo in avanti rispetto alla cultura matematica del tempo, la regola inventata da dal Ferro necessitava tuttavia di ulteriori precisazioni per poter valere anche nel caso di una generica equazione completa come $ax^3 + bx^2 + cx + d = 0$. Anzitutto, bisognava trovare un'opportuna trasformazione per poterla ridurre alla forma desiderata priva del termine in x^2; inoltre, ostacolo ben più grave, nel caso $x^3 = px + q$ e $x^3 + q = px$, con p e q entrambi numeri positivi, poteva accadere che l'espressione $q^2/4 + p^3/27$ sotto radice quadrata fosse negativa, facendo così perdere significato alla formula. Sarà questo, come vedremo, il cosiddetto «caso irriducibile», la cui discussione si doveva rivelare ricca di risultati teorici assolutamente inaspettati.

Entrambe queste difficoltà non erano state tuttavia affrontate da Tartaglia, che nelle sue ricerche provocate dalla sfida di Anton Maria Fiore non era andato di fatto oltre alla regola trovata da Scipione, anche se l'aveva ottenuta in maniera originale. Tutto ciò era stato comunque sufficiente per riuscire vincitore nella disputa con Fiore e scoraggiare altri eventuali sfidanti. Contrariamente a quanto aveva fatto Scipione, Tartaglia fece infatti abilmente circolare la notizia di essere in possesso di tal formidabile arma, senza tuttavia rivelarne i segreti. Così, nelle mani del matematico bresciano, la regola per lo scioglimento di quel difficile capitolo dell'arte dell'algebra si rivelò uno strumento decisivo per assicurarsi il successo nelle contese che all'epoca si ingaggiavano frequenti tra i matematici, sia per ottenere una lettura presso uno Studio universitario sia per difendersi dagli assalti di eventuali concorrenti.

Tra coloro che vennero a conoscenza della straordinaria scoperta fatta da Tartaglia vi fu il pubblico lettore di Euclide a Milano, Girolamo Cardano. Medico di fama europea e brillante matematico, accanito giocatore di dadi e abile spadaccino, esperto di magia naturale, in odore di eresia e al tempo

stesso protetto da cardinali e papi, interprete dei sogni e facitore di oroscopi, Cardano affidò alle pagine autobiografiche del *De vita propria liber* (1575) il racconto delle proprie contraddittorie e tormentate vicende, l'orgogliosa rivendicazione dei propri meriti di scienziato e la difesa dalle accuse degli avversari.

Nel 1539 Cardano era stato a sua volta sfidato da tale messer Zuanne da Coi, che aveva già sfidato senza successo anche Tartaglia, a sciogliere quesiti che portavano ad equazioni di terzo grado. Sapendo che Tartaglia aveva trovato la formula risolutiva, Cardano si rivolgeva al matematico bresciano chiedendogli di comunicargliela. Dopo aver lungamente rifiutato, questi alla fine cedeva alla richiesta di Cardano, che gli faceva anche intravvedere la possibilità di essere introdotto presso nobili e autorevoli personaggi del tempo. Sotto giuramento «ad sacra Dei Evangelia» di non rivelare a nessuno la regola, Tartaglia gliela comunicava «suppressa demonstratione» con delle terzine in rima diventate celebri:

«Quando chel cubo con le cose appresso	[$x^3 + px$]
se agguaglia a qualche numero discreto	[$= q$]
trovan dui altri differenti in esso.	[$u - v = q$]
Da poi terrai questo per consueto	
che'l lor produtto sempre sia eguale	[$uv =$]
al terzo cubo delle cose neto,	[$p^3/27$]
el residuo poi suo generale	
delli lor lati cubi ben sottratti	[$\sqrt[3]{u} - \sqrt[3]{v}$]
varrà la tua cosa principale» (Tartaglia 1546, 266).	[$= x$]

Nelle terzine seguenti Tartaglia dava la regola per il caso «chel cubo restasse lui solo», cioè $x^3 = px + q$, e per il rimanente caso $x^3 + q = px$. Se si svolgono le operazioni prescritte da Tartaglia, che abbiamo indicate a lato in simbolismo moderno, si ritrova la formula precedentemente considerata. Nelle sue rime Tartaglia celava inoltre uno dei contributi più significativi alla teoria delle equazioni algebriche, il cui profondo significato verrà compiutamente messo in luce solo da J. L. Lagrange (vol. II, cap. VI) più di due secoli dopo: per giungere alla formula risolutiva, infatti, il matematico bresciano si serviva di quella che sarà chiamata la «risolvente» dell'equazione di terzo grado, cioè l'equazione *di secondo grado*

$$v^2 + qv = p^3/27$$

ottenibile eliminando la u dal sistema

$$\begin{cases} u - v = q \\ uv = p^3/27. \end{cases}$$

Mediante la «risolvente» in v Tartaglia poteva determinare facilmente la v stessa, quindi la u, e infine l'incognita x. Anche se velata dai versi in rima, non doveva essere difficile per Cardano ricavare la regola che tuttavia, mantenendo la promessa, egli non pubblicava nella *Practicae arithmeticae*. Quando fu sfidato da Zuanne da Coi, egli stava terminando la stesura di quest'opera che, tramite i buoni uffici di Osiander, apparve a stampa a Norimberga nel 1539.

Saggiando con esempi numerici la bontà della regola che gli era stata data, Cardano s'imbatté nell'equazione $x^3 = 9x + 10$, in cui «il cubo della terza parte delle cose eccede il quadrato della mita del numero» e non si può applicare la regola giacché si arriverebbe a dover calcolare la radice quadrata di un numero «falso» (negativo), cioè una quantità «sofistica» come $\sqrt{-2}$. Egli si rivolse allora a Tartaglia chiedendo lumi, ma questi, neppure lui in grado di chiarire la faccenda, si atteggiò a maestro infastidito dalle petulanti domande di uno che, a suo dire, rivelava di non avere chiari neppure i primi rudimenti «che se insegna ad uno scolaro che voglia dar principio all'algebra» (Tartaglia 1546, 124r).

Nonostante le evanescenti risposte di Tartaglia, Cardano continuò nelle sue ricerche insieme al suo geniale allievo Ludovico Ferrari (1522-1565), matematico bolognese autore di importantissimi contributi alla teoria delle equazioni. Un paio d'anni più tardi, passando da Bologna, Cardano venne a sapere da Annibale della Nave che la regola, che egli pensava brillante ed esclusiva invenzione di Tartaglia, era in possesso dello stesso della Nave ed era stata trovata molto tempo prima da Scipione. Sentitosi così libero dal giuramento reso al matematico bresciano, Cardano pubblicava la regola, con la dimostrazione che egli aveva trovata, nell'*Artis magnae, sive de regulis algebraicis liber unus*, apparso a stampa a Norimberga nel 1545. Usualmente chiamata *Ars magna*, l'opera di Cardano segna una svolta nella storia della matematica, il definitivo superamento dell'algebra medioevale e l'inizio di una nuova epoca.

«Qui haec attigerit, nihil non intelligere posse se credat», esclamava Cardano in apertura del volume, riferendosi all'invenzione della regola di risoluzione delle equazioni cubiche, che egli riconosceva aver avuto da Tartaglia, ma la cui prima paternità affermava esplicitamente essere stata di Scipione dal Ferro.

Richiamandosi nella dimostrazione della regola risolutiva alla tradizione della matematica araba, fatta propria da Leonardo Pisano, Cardano interpretava i termini dell'equazione di terzo grado in maniera «naturalmente» geometrica: se «le linee corrispondono alle cose, le superfici ai censi e i corpi ai cubi» allora risolvere l'equazione cubica significa per Cardano «completare» un dato cubo, così come risolvere un'equazione di secondo grado aveva

tradizionalmente significato «completare» un quadrato. Infatti se x^3 è un cubo di spigolo uguale alla «cosa» x, allora p ha la dimensione di un dato quadrato e q quella di un volume dato, differenza di due cubi.

La dimostrazione di Cardano si riconduceva dunque alla verifica in termini geometrici dell'identità algebrica

$$(\sqrt[3]{u}-\sqrt[3]{v})^3=u-v-3(\sqrt[3]{u}-\sqrt[3]{v})\sqrt[3]{u}\sqrt[3]{v}$$

che egli esibiva con l'esempio paradigmatico dato dall'equazione numerica $x^3+6x=20$.

Ma l'interpretazione geometrica, «naturale» per le equazioni dei primi tre gradi, viene meno allorché si tratta di andare oltre, di affrontare il capitolo dell'equazione di 4° grado: sarebbe stolto, dice Cardano, «nos ultra progredi, quo naturae non licet», spingerci oltre, dove la natura non lo permette. E tuttavia egli si avventura a trattare quelle artificiose creazioni costituite dalle equazioni di 4° grado, frutto di una «voluptas» dell'ingegno, che pure «non sunt per se, sed per accidens» e che tuttavia il suo brillante allievo Ferrari aveva trovato la maniera di risolvere, riconducendole ad una «risolvente» di terzo grado.

Per un'equazione come la $ax^4+bx^2+c=dx$, la strategia di risoluzione escogitata da Ferrari consisteva nell'aggiungere ad ambo i membri opportune quantità in modo da ridurli ad essere entrambi dei quadrati e poi estrarre la radice quadrata, per ottenere così un'equazione facilmente risolubile: una complessa procedura algebrica che sfuggiva ad una completa traduzione in termini geometrici, nonostante gli ingegnosi stratagemmi epistemologici posti in atto da Cardano, quale quello di considerare x^4 un quadrato di lato x^2.

Nell'*Ars magna* l'idea di Ferrari è illustrata con l'esempio numerico dell'equazione: $x^4+6x^2+36=60x$ cui si riduceva un quesito posto ancora una volta da «quel diavolo» di messer Zuanne da Coi a Cardano: «Fa di 10 tre parti continue proporzionali, di cui la prima moltiplicata per la seconda dia 6». «Io in verità dicevo di poterlo risolvere, ma ignoravo tuttavia il modo — confessa Cardano — finché Ferrari non lo trovò». Se si aggiunge ai due membri dell'equazione: $6x^2+2x^2y+(y^2+12y)$, dove y è una nuova incognita, si ottiene:

$$(x^2+y+6)^2=2(y+3)x^2+60x+y^2+12y.$$

Il primo membro è un quadrato perfetto; affinché lo sia anche il secondo deve essere:

$$30^2=2(y+3)(y^2+12y)$$

da cui si ottiene la «risolvente» di terzo grado:

$$y^3 + 15y^2 + 36y = 450$$

che consente di determinare la y e risolvere completamente l'equazione data con un'estrazione di radice quadrata, che porta ad una equazione di secondo grado in x.

Se il modello geometrico è per Cardano il «naturale» argomento dimostrativo, d'altra parte spesse volte, come in questo caso, egli è costretto ad allontanarsene, «quasi coactus aut incitatus» dalla prepotente autonomia del linguaggio algebrico. Questa continua dialettica tra concetti e sviluppi algebrici e le corrispondenti immagini geometriche percorre — spesso irrisolta — molte delle pagine dell'*Ars magna*. Così ad esempio, parlando di numeri negativi, per i quali non sa trovare un corrispettivo geometrico, Cardano si richiama al linguaggio degli abacisti e dei mercanti, in cui interpretati come debiti e crediti i numeri relativi trovarono la loro prima giustificazione. Egli opera con sicurezza e disinvoltura con numeri «falsi» (negativi), con le loro potenze e radici cubiche, mentre considera «sofistici» problemi che portano a radici quadrate di numeri «falsi», come per esempio quando si chiede di dividere un segmento lungo 10 in due parti il cui prodotto sia 40. «Operando per algebra» si ottengono infatti le espressioni $5+\sqrt{-15}$, $5-\sqrt{-15}$, quantità sofistiche che non danno la misura di alcun segmento.

Ben più sconcertante e paradossale era ciò che avveniva per il «caso irriducibile», dove l'ostacolo non stava nella formulazione del problema — le soluzioni sono infatti reali — quanto nella procedura adottata per risolverlo. Cercando di indagare più da vicino la questione, nel tentativo di trovare qualche altro procedimento applicabile anche a quel caso, Cardano e Ferrari scoprirono numerose relazioni fondamentali tra i coefficienti di un'equazione algebrica e le sue radici, così come la maniera di trasformare un'equazione a radici negative in una a radici positive, il modo per eliminare il termine in x^2 nelle equazioni cubiche e il fatto che il coefficiente di tale termine è dato dall'opposto della somma delle radici. All'esposizione di tali risultati sono dedicate molte delle pagine più interessanti dell'*Ars magna*.

La pubblicazione del volume di Cardano scatenava l'ira furibonda di Tartaglia che, nonostante i ripetuti ed espliciti riconoscimenti alla sua scoperta in esso contenuti, vi vedeva comunque una patente violazione del giuramento resogli dal matematico milanese. La sua reazione non si faceva attendere e già l'anno successivo egli prendeva pubblicamente posizione in un trattato di *Quesiti e inventioni diverse*, nel quale inoltre raccoglieva le sue soluzioni di problemi di balistica e statica postigli da «bombarderi» e uomini d'arme. Già nel 1537 Tartaglia aveva pubblicato una prima trattazione

matematica della *Nova scientia*, la balistica appunto, dimostrando, tra l'altro, che la massima gittata di un proiettile si otteneva con un alzo di 45°. Ora, nei primi otto libri dei *Quesiti*, si diffondeva ampiamente sui vari «accidenti» dei tiri delle artiglierie, sulla composizione della polvere da sparo e sull'uso del «bossolo» nel disegnare le piante delle città, sull'ordinar le schiere in battaglia, fortificare le città e renderle inespugnabili alle «particolari sottilità» dei nemici. Nel nono e ultimo libro dei *Quesiti*, affrontava invece questioni di algebra, raccontando come, sfidato da Fiore, fosse pervenuto alla sua invenzione della regola per il caso di «cose e cubo equal numero» e come poi l'avesse comunicata a Cardano dietro le sue pressanti richieste.

Per rivendicare con maggior forza i propri diritti, a suo modo di vedere calpestati dal tradimento di Cardano, Tartaglia nel raccontare la propria versione della vicenda non esitava a trattare con grande sufficienza o aperta denigrazione Cardano, «huomo che tien poco sugo», che non aveva compreso la regola neppure dopo che Tartaglia gliela aveva comunicata con le sue rime, uno che incespicava addirittura nel risolvere problemi elementari e si era rivelato «molto più tondo» di quanto egli stimasse sulle prime.

A difesa del prestigio matematico del suo maestro Cardano interveniva allora Ludovico Ferrari, indirizzando a Tartaglia un primo «cartello di matematica disfida» e chiamando a testimoni nella contesa numerosi dotti in varie città d'Italia, i quali «tutti si dilettano, e sanno delle mathematice».

Alla sfida di Ferrari, Tartaglia replicava a sua volta con un pubblico cartello in cui chiamava direttamente in causa Cardano, il vero avversario del matematico bresciano. I sei cartelli e le altrettante risposte che allora intercorsero tra Ferrari e Tartaglia — Cardano infatti, nonostante le provocazioni ripetute di Tartaglia si tenne (almeno pubblicamente) sempre fuori dalla contesa — rappresentano uno dei documenti più straordinari della storia della matematica. Oltre a fornirci immagini di rara efficacia sui costumi della comunità matematica dell'epoca, i cartelli consentono infatti di cogliere, con la vivacità della violenta polemica in corso, la ricchezza e la varietà degli argomenti che animavano la ricerca in un periodo di grande e fecondo sviluppo creativo. I 62 quesiti proposti e discussi dai due contendenti sotto gli occhi del pubblico matematico del tempo abbracciano i temi più diversi, da questioni di geometria classica — la cui soluzione richiedeva tuttavia i più recenti risultati algebrici — a problemi da risolvere col compasso ad apertura fissa, a quesiti numerici traducibili in equazioni cubiche o quadratiche, alla richiesta di valori approssimati di radici di numeri.

La conclusione della sfida si ebbe il 10 agosto 1548 con un pubblico confronto svoltosi a Milano: l'esito fu però largamente inferiore alle premesse. Dopo aver trascorso un intero pomeriggio in schermaglie iniziali su un problema tratto da Vitruvio, Tartaglia non si ripresentava il giorno

seguente, abbandonando il campo, a suo dire, per l'aperta ostilità del pubblico presente.

Di fatto, mentre a Ferrari furono offerte diverse vantaggiose letture presso Studi universitari, Tartaglia, dopo la contesa, poté solo ribadire la propria versione di tutta la vicenda nelle pagine del *General trattato di numeri e misure* (1556), vera e propria enciclopedia matematica che ebbe grande diffusione e la cui seconda parte apparve nel 1560, dopo la morte del suo irrequieto autore.

3. *L'Algebra di Bombelli.*

Il «cittadino bolognese» Rafael Bombelli dava alle stampe nel 1572 un imponente trattato, l'*Opera su l'algebra*, che costituisce il frutto più maturo del vasto e originale campo di ricerca inaugurato dall'opera di Scipione dal Ferro e che per più di un secolo fu il più autorevole testo di algebra superiore. Studiando le pagine di Bombelli, Leibniz completerà la propria formazione matematica. Huygens elogerà le prime ricerche originali di Leibniz scrivendogli che aveva «fatto di più di Bombelli».

Di Rafael Bombelli non si hanno notizie biografiche certe, tranne i pochi cenni di sé che egli dà nella prefazione alla sua opera, composta «all'hora che quasi era abbandonata l'impresa della essicazione della palude Chiana» in Toscana, cui Bombelli aveva partecipato. Dopo una prima stesura manoscritta, che dovette circolare tra i matematici bolognesi e di cui si conoscono due esemplari, Bombelli procedette ad una revisione radicale del suo lavoro successivamente alla scoperta (in un codice vaticano) dell'*Aritmetica di Diofanto*, «autor greco ... assai intelligente de' numeri». Diofanto (matematico vissuto probabilmente nel III secolo d.C.) è stato in effetti il fondatore dell'analisi indeterminata, vale a dire di quella parte della matematica che studia la risolubilità delle equazioni algebriche mediante numeri interi (o razionali). Arricchita la propria opera di problemi diofantei, Bombelli la dava alle stampe, riservandosi «con più mio agio e commodità di dare al mondo tutti questi problemi in dimostrationi geometriche» (Bombelli [1572], 1966, 314).

L'opera geometrica annunciata non fu tuttavia mai pubblicata. Il libro primo dell'*Algebra* di Bombelli si apre con la definizione delle potenze intere dei numeri e la successiva estensione del campo numerico con l'introduzione della radice quadrata di un numero intero, «il lato di un numero non quadrato; il quale è impossibile poterlo nominare; però si chiama radice sorda overo indiscreta» (*Ibid.*, 13). Analoga è la definizione della radice cubica e di indice successivo, oggetti numerici per i quali Bombelli definisce inoltre le operazioni di addizione e sottrazione, moltiplicazione di un radicale

per un numero e per un altro radicale, divisione di due radicali. In particolare egli mostra come rendere razionale una frazione che abbia a denominatore un'espressione come $\sqrt[3]{a} \pm \sqrt[3]{b}$, moltiplicandola per il suo «residuo cubico» $\sqrt[3]{a^2} \mp \sqrt[3]{ab} + \sqrt[3]{b^2}$ come aveva insegnato Scipion dal Ferro; e ancora, trasformare una «radice cuba legata» cioè un numero irrazionale della forma $\sqrt[3]{\sqrt{n} \pm \sqrt{m}}$ nel binomio (o «reciso», nel suo linguaggio) $\sqrt{v} \pm u$.

Bombelli presentava inoltre una procedura per approssimare arbitrariamente («come l'huomo vorrà») la radice quadrata di un numero non quadrato perfetto con una tecnica che prefigurava quella delle frazioni continue, esplicitata da Cataldi di lì a qualche anno (vol. I, cap. X). Infine Bombelli introduceva i numeri immaginari per trattare le equazioni cubiche anche nel caso irriducibile ed era questo il fatto più rilevante dal punto di vista teorico presente nell'*Algebra.*

«Ho trovato un'altra sorte di Radici legate cube molto differente dall'altre — scriveva Bombelli (*Ibid.*, 133) — la qual nasce dal capitolo di cubo eguale a tanti e numero, quando il cubato del terzo delli tanti $[p^3/27]$ è maggiore del quadrato della metà del numero $[q^2/4]$», il caso irriducibile appunto. Nelle sue ricerche il matematico bolognese non era guidato da puro amore di generalità. Il risultato cui era stato condotto (i numeri immaginari) era certamente sconcertante: anche se «parerà a molti piuttosto sofistica che reale, tale opinione — confessava francamente Bombelli — ho tenuto anch'io sin che ho trovato la sua dimostrazione in linee» (cioè in termini geometrici). Si trattava tuttavia di un'operazione «necessarissima» giacché «molto più sono li casi dell'agguagliare dove nasce questa sorte di Radice» che quelli risolvibili con gli usuali radicali cubici reali. Il caso irriducibile non è una bizzarra eccezione, ma si presenta assai di frequente.

Di fronte ai nuovi enti, Bombelli assume un atteggiamento decisamente «moderno»: evita con cura ogni discorso sulla «natura ultima» di tali numeri, e espone direttamente le regole di calcolo, dopo aver osservato che tale «sorte di Radice ha nel suo algorismo diversa operazione dalle altre e diverso nome». Il nome proposto per l'unità immaginaria (oggi indicata con i) è del tutto peculiare e proprio solo di Bombelli: poiché «non si può chiamare né più, né meno, però lo chiamerò *più di meno* [+ i] quando egli si dovrà aggiungere, e quando si dovrà cavare lo chiamerò *men di meno* [− i]». Quanto alle regole di calcolo, egli esponeva in primo luogo quella «del più et meno» per il prodotto: in simbolismo moderno

$$(\pm 1)(+i) = \pm i$$
$$(\pm 1)(-i) = \mp i$$
$$(\pm i)(+i) = \mp 1$$
$$(\pm i)(-i) = \pm 1$$

«Si deve avvertire che tal sorte di Radici legate — continuava Bombelli — non possono intravenire se non accompagnato il Binomio col suo residuo»; in altre parole, nella risoluzione di una equazione cubica non si può avere una radice complessa $a+ib$ se non accompagnata dalla sua coniugata $a-ib$, la cui somma è il numero reale $2a$.

La necessità di considerare tali enti era da Bombelli esibita concretamente nel secondo libro dell'*Algebra* quando, dopo avere esposto la teoria delle equazioni di secondo grado e la regola di Cardano (come egli la chiamò) per quelle di terzo, passava a considerare l'esempio dell'equazione $x^3=15x+4$. Qui, la semplice applicazione della regola portava a questo risultato:

$$x=\sqrt[3]{2+\sqrt{-121}}+\sqrt[3]{2-\sqrt{-121}}.$$

Ora, trovato *per tentativi* che

$$\sqrt[3]{2+\sqrt{-121}}=2+i \text{ e che } \sqrt[3]{2-\sqrt{-121}}=2-i$$

(come è facile verificare *a posteriori* utilizzando le regole date per calcolare con i), Bombelli concludeva che $x=4$.

Era in questo passo il contributo decisivo di Bombelli alla teoria delle equazioni, giacché egli mostrava che la formula trovata da Scipione consentiva di determinare una radice reale, anche nel caso irriducibile, a condizione di trasformare una radice cubica del tipo $\sqrt[3]{m\pm i\sqrt{n}}$ in un numero complesso $u\pm iv$. Infatti, la somma di quel numero complesso e del suo coniugato dava il valore della x cercato. «Et benché a molti parerà questa cosa stravagante, perché di questa opinione fui anch'io già un tempo, parendomi più tosto sofistica che vera, nondimeno — concludeva Bombelli — tanto cercai, che trovai la dimostratione» (*Ibid.*, 225).

La dimostrazione tanto cercata consisteva in una costruzione geometrica volta ad assicurare l'*esistenza* della radice. Prendendo come esempio *paradigmatico* — com'era per gli standard di rigore del tempo e come abbiamo visto fare anche Cardano — l'equazione $x^3=6x+4$ Bombelli mostrava come costruire «istromentalmente» con due squadre, una volta fissata l'unità di misura dei segmenti, un rettangolo di lati x e x^2-6 e di area 4. Muovendo opportunamente le squadre, Bombelli affermava (per ragioni di continuità dei segmenti) di poter determinare il lato x. Ma se l'argomento geometrico poteva assicurare una dimostrazione di natura esistenziale, forse soddisfacente dal punto di vista del rigore euclideo nonostante il suo carattere empirico, «quanto al trovare una regola generale colla quale si possa agguagliare questo capitolo» (cioè risolvere il caso irriducibile) senza ricorrere ai numeri complessi, «sino ad hora — affermava Bombelli — [lo] ritengo impossibile».

La ricerca di una «regola generale» efficace anche per questo difficile «capitolo», e che tuttavia evitasse radici quadrate di numeri negativi, aveva a lungo impegnato anche Cardano, che nel 1570 aveva pubblicato gli esiti dei suoi sforzi infruttuosi nel *De regula aliza libellus*, aggiunto come appendice alla ristampa dell'*Ars magna*. Egli vi arrivava a congetturare la necessità di ricorrere a quantità «silvestri», non ottenibili da operazioni su alcun genere di radici. L'opera di Bombelli si opponeva dunque alle convinzioni più radicate di Cardano e di fronte alle operazioni che quello effettuava con quantità né positive né negative ma «di una qualche terza natura nascosta» (come egli stesso aveva sospettato e scritto in un opuscolo fossero quelle radici «sofistiche») Cardano non esitava ad affermare che «ciò distrugge tutto Euclide».

Non sfuggiva a Cardano, né poteva sfuggire a Bombelli, il fatto che quei suoi «più di meno» e «meno di meno» perdevano una delle peculiarità degli altri sistemi numerici, cioè di poter essere linearmente ordinati secondo grandezza; il che, ai loro occhi, vanificava la possibilità di una qualunque interpretazione in termini di grandezze geometriche.

Per aggirare le difficoltà, pur ritenendo impossibile una regola generale per la risoluzione delle equazioni cubiche che escludesse il ricorso agli immaginari, Bombelli aveva cercato «più sorti di trasmutationi» cui sottoporre le equazioni, «non mi confidando delle ragioni assignate». In queste ricerche egli arrivò a ipotizzare l'esistenza di relazioni fra uno dei problemi classici dell'antichità, quello della trisezione dell'angolo e la risoluzione di un'equazione cubica nel caso irriducibile.

Se la discussione intorno al caso irriducibile era certo il contributo più originale di Bombelli, non meno rilevante era la trattazione sistematica delle equazioni di 4° grado. Analizzando ordinatamente tutti i 42 casi diversi che si possono presentare, Bombelli dava un'esposizione completa della teoria anticipata da Ferrari in un caso che oggi si può considerare come generale e paradigmatico, ma che all'epoca, per la difficoltà e la novità dell'argomento, era temerario ritenere tale.

Raccogliendo in un corpo organico di nuove teorie algebriche la ricca messe di risultati che la feconda stagione del Rinascimento italiano aveva prodotto nel campo della matematica, l'*Algebra* di Bombelli divenne il necessario punto di riferimento dei cultori europei di matematica, oggetto di studio e di nuove riflessioni.

4. *Viète e l'«arte analitica».*

L'intuizione di Bombelli dell'esistenza di una relazione tra il caso irriducibile e il problema della trisezione dell'angolo trovò esplicita conferma

con François Viète (1540-1603). Avvocato e membro del parlamento di Bretagna prima di diventare consigliere di Enrico III e di Enrico di Navarra, Viète fu uno straordinario dilettante di matematica, che alla scienza poteva dedicare il tempo che i numerosi impegni politici gli lasciavano libero.

Le sue prime ricerche si erano rivolte alla trigonometria, la antica scienza della «misura degli elementi di un triangolo» degli astronomi babilonesi e alessandrini, ampliata e rinnovata nelle opere di Regiomontano (1436-1476) e di Retico (1514-1576), il cui *Opus palatinum de triangulis* costituì la più matura esposizione dei risultati ottenuti allora dai matematici in quel campo. Fin dall'antichità erano stati considerati i rapporti tra i cateti e l'ipotenusa di un triangolo rettangolo per misurare gli angoli del triangolo. Per questa via furono introdotte le funzioni trigonometriche come il seno e il coseno di un angolo (definibili rispettivamente come il rapporto tra il lato opposto all'angolo e l'ipotenusa, e come il rapporto tra il lato adiacente all'angolo e l'ipotenusa di uno stesso triangolo rettangolo). Le continue rettifiche al sistema tolemaico avevano condotto alla necessità di avere sempre migliori tavole trigonometriche, che dessero i valori per variazioni piccole di angoli, in modo da ottenere calcoli astronomici sempre più precisi.

A questa impresa si erano dedicati Regiomontano e Retico; allo stesso scopo era indirizzato il *Canon mathematicus* (1579) di Viète. Qui, opponendosi ad una tradizione che risaliva agli antichi caldei e babilonesi, Viète prese netta posizione contro l'uso di frazioni sessagesimali in questo tipo di calcoli a favore invece delle frazioni decimali: «Sessantesimi e sessantine — egli scriveva — non vanno usati se non raramente in matematica, mentre millesimi e migliaia, centesimi e centinaia, decimi e decine, e progressioni simili, ascendenti e discendenti, vanno usati frequentemente o esclusivamente» (in Boyer 1968, 349). Nel *Canon* Viète pubblicò tavole trigonometriche per le funzioni seno e coseno (e i loro rapporti: tangente = seno/coseno e cotangente = coseno/seno) per angoli di minuto in minuto.

Manipolazioni sulle funzioni trigonometriche (anche se il termine «funzione» rappresenta qui solo un comodo anacronismo per indicare le operazioni e i risultati delle complesse procedure calcolistiche dell'epoca) erano allora assai frequenti nel tentativo di trovare semplificazioni ai calcoli astronomici; tra le identità trigonometriche più utili in pratica c'erano formule per trasformare il prodotto di due funzioni trigonometriche nella loro somma o differenza (le cosiddette *regole di prostaferesi*).

Mediante considerazioni geometriche, Viète aveva ricavato l'identità

$$\text{sen}\, p + \text{sen}\, q = 2\, \text{sen}\, \frac{p+q}{2} \cos \frac{p-q}{2}$$

e l'analoga per il coseno; formule note oggi col nome di Werner (1468-1528), il geometra tedesco autore di un *Libellus super vigintiduobus*

elementis conicis (1522) che segnò la rinascita dell'interesse per lo studio di queste curve già trattate nell'antichità da Apollonio.

Formule per il seno e il coseno di un angolo doppio erano note dai tempi di Tolomeo: ricorrendo ad esse e alle identità trovate più recentemente Viète riusciva a giungere a formule per gli angoli multipli, calcolando sen np e cos np con n numero intero qualsiasi.

La formula che esprimeva sen np in funzione di sen p si rivelò di inaspettata utilità, consentendo a Viète di risolvere un problema algebrico posto dal matematico belga Adriaen van Roomen, noto anche col nome latinizzato di Adrianus Romanus (1561-1615). Questi, nel suo libro *Ideae mathematicae* (1593), aveva sfidato i matematici europei a risolvere un'equazione di quarantacinquesimo grado; la sfida trovò un'eco presso la corte di Enrico IV, che invitò Viète a cimentarsi. Questi riconobbe che il correlato geometrico del problema posto da Romanus era di trovare, data la corda di un arco, la corda della quarantacinquesima parte dell'arco; in altri termini, di esprimere sen 45A in termini di sen A e di determinare poi sen A. Ponendo infatti sen $A=x$, si otteneva l'equazione algebrica di 45° grado proposta da Romanus.

Viète risolse senza difficoltà il problema scindendo l'equazione proposta nel prodotto di un'equazione di 5° grado e di due equazioni di terzo e determinando le 23 radici positive. Esitante e incerto di fronte ai numeri negativi, egli trascurò completamente le radici negative dell'equazione.

La sua grande familiarità con la manipolazione di formule e identità trigonometriche consentì inoltre a Viète di esplicitare ciò che Bombelli aveva solo intravisto: la connessione tra il problema della trisezione dell'angolo e il caso irriducibile delle equazioni di terzo grado. Infatti dall'equazione $x^3+px+q=0$ con la sostituzione $x=my$ si ottiene l'equazione $y^3+yp/m^2+q/m^3=0$, dove m rappresenta una quantità che possiamo determinare a piacere. Se si confronta ora quest'ultima equazione con la seguente identità trigonometrica:

$$\cos^3 \theta/3-\frac{3}{4}\cos \theta/3-\frac{1}{4}\cos \theta=0$$

richiedendo che sia

$$p/m^2=-3/4 \quad \text{e} \quad q/m^3=-\frac{1}{4}\cos \theta$$

si ricavano per m e cos θ i seguenti valori reali (poiché $p<0$)

$$m=\sqrt{-4p/3} \quad \text{e} \quad \cos \theta=-q/2\sqrt{-p^3/27}$$

che consentono di ricavare la y e quindi la x senza ricorrer agli immaginari («At elegantius et praestantius ex analyticis angularium sectionum huiusmodi aequalitatum constitutio eruitur»).

Viète aveva esposto questo metodo nel *De aequationum recognitione et emendatione* (1591), pubblicato postumo insieme ad altre opere di Viète nel 1615 dal suo allievo Alexander Anderson (1582-?), uno scozzese professore di matematica a Parigi. Queste sue idee erano state riprese ancora da Albert Girard (1590-1633) nella *Invention nouvelle en l'algèbre* (1629), un'opera che si richiamava ampiamente alla tradizione degli algebristi italiani e rivelava di fronte ai numeri negativi e immaginari (le «racines indicibles») un atteggiamento assai più spregiudicato di quello di Viète.

La soluzione trigonometrica del caso irriducibile trovata da Viète godette comunque dell'universale approvazione dei matematici, generalmente restii ad accettare gli stravaganti «numeri» proposti da Bombelli. «Vi sono già così tante cose sicure a cui lavorare, che non v'è alcun bisogno di affaticarsi intorno a cose incerte» era per esempio l'opinione di Simon Stevin (1548-1620) di Bruges. Ammiratore dei matematici dell'antichità, ma attento alle esigenze della società civile del tempo, Stevin ebbe una concezione della matematica fortemente orientata dalle necessità pratiche.

Egli stesso aveva lavorato da giovane come contabile, tenendo i libri mastri di una casa di commercio, prima di intraprendere lunghi viaggi in Europa. Seguace di Guglielmo d'Orange, antispagnolo e tollerante in materia di religione, Stevin trascorse poi lunga parte della sua vita al servizio di Maurizio di Nassau come sovraintendente alle opere di ingegneria civile e militare del principe.

Nel 1585 Stevin aveva pubblicato a Leida un volume (in francese) di suoi scritti: un'*Arithmétique*, che rappresenta la sintesi delle conoscenze aritmetiche del tempo ed è largamente ispirata alle opere degli algebristi italiani. Ad essa si accompagnava la traduzione francese dei primi 4 libri di Diofanto, una *Practique d'arithmétique*, comprendente una tavola col computo degli interessi (che Stevin aveva già pubblicato in precedenza ad uso dei mercanti) e infine un opuscolo di sette pagine, intitolato *La thiende* (Il decimo) in fiammingo e *La disme* in francese, dove Stevin affermava di insegnare a «facilement expedier par nombres entiers sans rompuz tous comptes se rencontrans aux affaires des hommes», a compiere cioè solo con numeri interi, senza frazioni, tutti i calcoli che si presentano negli affari degli uomini.

La disme ebbe una popolarità straordinaria, anche se l'argomento non era certo nuovo. Stevin vi impiegava, per indicare le frazioni, una notazione ispirata a Bombelli, dove i simboli ⓪, ①, ②ecc. posti a destra delle cifre indicavano rispettivamente la parte intera, i decimi, centesimi, ecc. di una frazione. Così per esempio 321, 467 era da Stevin indicato 321 ⓪ 4 ① 6 ② 7 ③; un modo che gli consentiva anche di compiere le usuali operazioni aritmetiche ponendo ordinatamente in colonna numeri: per esempio l'addizione

$$\begin{array}{ccccc}
 & \textcircled{0} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} \\
5 & 3 & 1 & 6 & 7 \\
 & & 4 & 9 & 1 \\
 & 3 & 8 & 1 & 3 \\
\hline
5 & 8 & 4 & 7 & 1
\end{array}$$

Il successo della *Disme* contribuì non poco alla universale diffusione della pratica del sistema decimale. Spesso basati su un fondamento empirico, ma ricchi di implicazioni teoriche erano invece alcuni risultati inseriti da Stevin nell'*Arithmétique*. Così per esempio, per risolvere l'equazione $x^3 = 300x + 33915024$ Stevin comincia a porre $x = 1, 10, 100$ osservando che per questi valori il primo membro è sempre minore del secondo, mentre il contrario avviene per $x = 1000$. La radice cercata sta dunque tra 100 e 1000, cioè ha tre cifre. Prova quindi con $x = 200, 300, 400$ osservando, analogamente a prima, che 300 è troppo piccolo e 400 troppo grande. Procedendo con questa tecnica arriva infine a determinare il numero 324, che è il valore della radice cercata.

Dietro la procedura empirica di Stevin non è difficile scorgere il teorema che se due valori x_1 e x_2 fanno assumere al primo membro di un'equazione $P(x) = 0$ segni opposti, allora tra essi si trova una radice dell'equazione e la tecnica di Stevin suggerisce appunto una maniera per ottenere una approssimazione sempre migliore della radice incognita. Stevin è consapevole della natura *ad hoc* dell'esempio proposto e avverte il lettore: «Il peut avenir qu'on pourra approcher infinement au requis sans toutesfois par ceste maniere pouvoir parvenir a la parfaicte solution».

Un carattere di ben maggiore generalità, dipendente anche da un'appropriata elaborazione del simbolismo algebrico, avevano le contemporanee ricerche di Viète sulle equazioni algebriche. Nel *De aequationum recognitione et emendatione*, oltre alla risoluzione trigonometrica dell'equazione di terzo grado, Viète inseriva infatti profonde considerazioni sulla razionalità o l'irrazionalità delle radici per equazioni algebriche con coefficienti dati in forma particolare e, per le equazioni dei primi 5 gradi, presentava le funzioni simmetriche («formule di Viète») che esprimono i coefficienti dell'equazione in funzione delle radici; un risultato di capitale importanza nella teoria delle equazioni algebriche, che Viète assicurava di aver trattato in maniera completa in un'altra occasione («Atque haec elegans et perpulchrae speculationis sylloge, tractavi alioquin effuso») di cui non ci è rimasta traccia.

Nello stesso anno in cui scriveva il *De aequationum* Viète pubblicava lo scritto di natura programmatica *In artem analyticam isagoge* (Introduzione all'arte analitica), al quale soprattutto deve la sua fama.

Pur ispirandosi all'aritmetica di Diofanto e ai più recenti autori italiani, Viète vi presentava concezioni fortemente originali. Nei ragionamenti algebrici, osservava, i matematici assumono come noto ciò che si deve ricavare (l'incognita, la «cosa») e con opportune trasformazioni algebriche ottengono condizioni mediante le quali determinare l'incognita. Una forma di ragionamento che gli antichi avevano chiamato «analisi», contrapposto alla «sintesi» propria delle costruzioni geometriche. Da qui il termine «arte analitica» che Viète propose e preferì in luogo dell'arabizzante «algebra».

Manifestando una grande generalità di vedute, Viète ammetteva che l'incognita potesse essere data non solo da numeri o segmenti ma da «tipi» o «specie» differenti di oggetti: la *logistica speciosa* nella sua terminologia era dunque l'algebra, una scienza che ragiona non su casi particolari come era invece la *logistica numerosa*, la scienza dei numeri e delle equazioni numeriche.

Nelle sue opere egli tuttavia conservò, pur arricchito da una felice scelta di alcuni simboli, il formalismo dell'algebra retorica usato da Cardano e Bombelli. Così se per indicare l'uguaglianza preferiva abbreviare in «aeq» il latino «aequalis» ignorando invece il simbolo «=», già introdotto nel 1557 nel *The whetstone of witte* di Robert Recorde (1510-1558) «poiché non ci sono due cose più uguali tra loro», d'altra parte propose ad esempio di indicare con consonanti le grandezze o quantità che si ritenevano note e le vocali per rappresentare le incognite nelle equazioni. Una convenzione che doveva diventare usuale dopo la leggera modifica, apportata da Descartes, di denotare l'incognita con le ultime lettere dell'alfabeto: x, y, z.

Della fecondità delle idee esposte nell'*Isagoge* Viète dava un saggio in diversi scritti, dagli *Zeteticorum libri quinque*, un'opera ispirata all'aritmetica di Diofanto, alle *Ad logisticen speciosam notae priores* al *De numerosa potestatum purarum atque adfectarum ad exegesin resolutione*, un trattato sulla risoluzione delle equazioni numeriche.

Per quanto importanti fossero i risultati di Viète, la pubblicazione postuma e disorganica della maggior parte dei suoi scritti — la prima raccolta della sua *Opera mathematica* fu pubblicata solo nel 1643 da F. van Schooten — ne impedì una piena valorizzazione e per qualche decennio la fama matematica di Viète subì una repentina eclissi. A ciò contribuì anche il linguaggio oscuro e talvolta criptico, ricco di grecismi e di personali neologismi, nel quale erano redatte le sue opere. «Ci vorrebbe un secondo Viète per tradurre il primo» commentava desolato Vaset dopo un vano tentativo di traduzione in francese del latino di Viète.

«Mi ricordo — scriveva significativamente Cavalieri a Torricelli (v. vol. I, cap. V) nel 1643 — che il sig.r Galileo di felice memoria mi disse, che dimandando ad alcuni Gentiluomini principali di Parigi di Francesco Vieta,

niuno disse di conoscerlo, se non quando soggiunse che era Cont.°, e segretario del Rè, che allora si rammentorno di lui, ma come mattematico non lo conoscevano» (in Cavalieri 1966, 762). E non stupisce che nella Francia attraversata dalle cruente lotte tra ugonotti e cattolici, ai «Gentiluomini di Parigi» fosse rimasta memoria dell'azione politica del segretario di Enrico III e Enrico IV, piuttosto che quella di qualche rara e difficile pubblicazione del «mattematico».

Galileo doveva aver avuto notizia di Viète attraverso Marin Getaldić (1568-1626) o Marinus Ghetaldus, il matematico iugoslavo che aveva conosciuto Viète a Parigi nel 1600 e che poi, a Padova, era entrato a far parte del circolo di scienziati riunito attorno a Galileo. A Parigi la conoscenza della «nouvelle algèbre» di Viète aveva «aperto gli occhi» a Getaldić, che scriveva entusiasta a Michel Coignet (1549-1623), matematico e ingegnere di Anversa, di riuscire ora a vedere «ciò che non si era potuto vedere nei secoli passati» nonostante i ripetuti sforzi dei più eminenti matematici, la «perfection de l'algèbre».

Di Viète, Getaldić curava la pubblicazione del *De numerosa potestatum* (1600) e alla sua opera algebrica si ispirava nei cinque libri della *De resolutione et compositione matematica*, apparsi a Roma nel 1630. Nel primo libro, alla maniera degli Antichi e secondo la lezione di Viète, Getaldić distingueva i due momenti dell'analisi (*resolutio*) e della sintesi (*compositio*) nel trattare le questioni matematiche. La *resolutio* a sua volta si divideva in due aspetti, quello teorico e quello dedicato all'analisi dei problemi: «Duplice è invece il genere di risoluzioni: uno attiene ai teoremi, e il suo fine consiste nella sola ricerca della verità, l'altro attiene ai problemi, e il suo scopo è ricercare la ragione della costruzione e della dimostrazione».

Una volta precisati i princìpi metodologici, Getaldić affrontava nella sua opera una notevole quantità di problemi, che risolveva ricorrendo alla *logistica speciosa*. Le soluzioni così ottenute gli indicavano poi come procedere alla sintesi geometrica. Nell'ultimo libro discuteva poi di questioni «quae sub algebram non cadunt», problemi che portano ad equazioni i cui coefficienti dipendono da funzioni trigonometriche di un angolo dato.

Con la figura di Viète la Francia si affacciava autorevolmente sulla scena della matematica europea. I metodi della sua «nouvelle algèbre», che avevano trovato in Getaldić un primo originale interprete, saranno ripresi, con una più matura consapevolezza dell'interazione fra tecniche algebriche e procedure geometriche, dalla generazione di matematici francesi — da Fermat a Descartes — protagonisti della ricerca nel nuovo secolo.

BIBLIOGRAFIA

Testi

R. BOMBELLI, *Opera su l'algebra* (1572), a cura di E. Bortolotti, Milano, Feltrinelli, 1966.
B. CAVALIERI, *Geometria degli indivisibili* (1635), a cura di L. Lombardo Radice, Torino, UTET, 1966.
G. CARDANO, *Ars magna seu de regulis algebraicis*, Norimberga 1545 (trad. ingl : *The Great Art*, a cura di T.R. Witmer, Cambridge, Mass., MIT Press, 1958).
ID., *De vita propria liber*, 1576 (trad. it : *Della mia vita*, a cura di A. Ingegno, Milano, Serra e Riva, 1982).
L Ferrari - N. Tartaglia· Cartelli di sfida matematica Riproduzione in fac-simile delle edizioni originali, 1547-1548, a cura di A. Masotti, «Supplementi e Commentari dell'Ateneo di Brescia», 1974.
L. PACIOLI, *Summa de arithmetica, geometria proportioni et proportionalità*, in fol., Venetia 1494.
Quesiti et inventioni diverse de Nicolò Tartaglia, Venezia 1546 (Riproduzione in fac-simile a cura di A. Masotti, Ateneo di Brescia, Brescia 1959).
F. VIÈTE, *Opera Arithmetica*, 1646 (trad. ingl.: *The Analytic Art*, a cura di T.R. Witmer, Kent, The Kent State University Press, 1983).

Studi

E. BORTOLOTTI, *La storia della matematica nell'Università di Bologna*, Bologna, Zanichelli, 1947.
C. BOYER, *The History of the Calculus and Its Conceptual Development*, New York, Dover, 1959.
ID., *A History of Mathematics*, New York, Wiley and Sons, 1968 (trad. it.. *Storia della matematica*, Milano, ISEDI, 1976).
M. CANTOR, *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*, vol. II (2° ed.), Lipsia, Teubner, 1900.
E. DIJKSTERHUIS e D.J. STRUIK (a cura di), *The Principal Works of Simon Stevin*, Amsterdam, Swets and Zeitlinger, 1955-1958.
R. FRANCI e L. TOTI RIGATELLI, *Storia della teoria delle equazioni algebriche*, Milano, Mursia, 1979.
IDD., *Introduzione all'aritmetica mercantile del Medioevo e del Rinascimento*, Urbino, Quattro Venti, 1982.
IDD., *Maestro Benedetto da Firenze e la storia dell'algebra*, in «Historia Mathematica», vol. 10, 1983, pp. 297-317.
M. KLINE, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, New York, Oxford University Press, 1972.
G. LORIA, *La storia delle matematiche dall'alba delle civiltà al tramonto del secolo XIX*, Milano, Hoepli, 1950.
S. MARACCHIA, *Da Cardano a Galois. Momenti di storia dell'algebra*, Milano, Feltrinelli, 1979.
A. MARRE, *Notice sur Nicolas Chuquet et son Triparty en la science des nombres*, in «Bollettino di Bibliografia e di Storia delle Scienze matematiche e fisiche», vol. 13, 1880-81, pp. 555-659 e 693-814; vol 14, pp. 413-460.
O. ORE, *Cardano, the Gambling Scholar*, Princeton, Princeton University Press, 1953.
Quarto Centenario della morte di Tartaglia Convegno di Storia delle Matematiche, 1957. Atti del convegno, a cura di A. Masotti, «Supplementi e Commentari dell'Ateneo di Brescia», 1960.
G. SARTON, *Simon Stevin of Bruges (1548-1620)* in «Isis», vol. 21, 1934, pp. 241-303.
E. STIPANIĆ, *L'œuvre principale de Getaldić «De resolutione et compositione mathematica»*, «Jugoslavenska Akademia Znanosti I Umjetnosti», Zagreb, 1969, pp. 91-104.

B.L. VAN DER WAERDEN, *A History of Algebra from Al-Khwarizmi to Emmy Noether*, New York, Springer Verlag, 1985.
W. VAN EGMOND, *The Algebra of Master Dardi of Pisa*, in «Historia Mathematica», vol. 10, 1983, pp. 399-421.
A.P. YOUSCHKEVITCH, *Geschichte der Mathematik im Mittelalter*, Lipsia, Teubner, 1964.

III. *I meccanici, gli ingegneri, l'idea di progresso*
(di Paolo Rossi)

1. *Gli artisti, gli ingegneri, i trattati.*

Molte traduzioni cinquecentesche in volgare di testi classici si rivolgono espressamente a un pubblico emergente: quello degli artigiani. Jean Martin, che traduce in francese (nel 1547) i trattati sull'architettura di Vitruvio (I sec. a.C.) scrive per «gli operai e le altre persone che non sono in grado di leggere il latino». Walter Rivius, che presenta lo stesso testo in tedesco nel 1548, si rivolge ad artigiani, artefici, scalpellini, architetti, tessitori. I numerosi commentari a Vitruvio offrono un chiaro esempio del significato e dell'importanza di queste «ripresentazioni» di classici. Ne *I dieci libri dell'architettura di Vitruvio tradotti e commentati* (Venezia, 1556), il commento del nobile veneziano Daniele Barbaro si trasforma in una sorta di enciclopedia. Barbaro, che si serve della collaborazione di Andrea Palladio (1508-1580), è a conoscenza di molti testi della tecnica cinquecentesca; utilizza l'*Arte del navegar* di Pedro di Medina, i trattati sul compasso e sulle proporzioni di Dürer, i commenti a Tolomeo del Commandino, la *Compositio horologiorum* di Sebastian Münster (1489-1552).

Entrando in rapporto con gli ambienti della cultura umanistica e con l'eredità del mondo classico, non pochi rappresentanti di gruppi di artigiani più avanzati cercano nelle opere di Euclide, di Archimede, di Erone, di Vitruvio una risposta alle loro domande. La letteratura del Quattrocento e del Cinquecento è, come tutti sanno, straordinariamente ricca di trattati di carattere tecnico che sono, talvolta, veri e propri manuali e contengono, in

altri casi, solo sparse riflessioni sul lavoro svolto da artisti o da «meccanici» o sui procedimenti impiegati nelle varie arti. A questa letteratura, prodotta da ingegneri, artisti, artigiani superiori appartengono gli scritti di Filippo Brunelleschi (1377-1446), di Lorenzo Ghiberti (1378-1455), di Piero della Francesca (1406 ca.-1492), di Leonardo da Vinci (1452-1519), di Paolo Lomazzo (1538-1600); i trattati sulle macchine da guerra di Konrad Keyser (1366-1405); le opere sull'architettura di Leon Battista Alberti (1404-1472), di Francesco Averlino detto il Filarete (1416-1470), di Francesco di Giorgio Martini (1439-1502); il libro sulle macchine militari di Roberto Valturio da Rimini (pubblicato nel 1472 e poi ristampato a Verona nel 1482 e 1483, a Bologna nel 1483, a Venezia nel 1493 e ben quattro volte a Parigi fra il 1532 e il 1555), i due trattati di Albrecht Dürer (1471-1528) sulla geometria descrittiva (1525) e sulle fortificazioni (1527), la *Pirotechnia* di Vannoccio Biringuccio (1480 ca.-1539 ca.) che esce nel 1540 ed è poi ripubblicata in due edizioni latine, tre francesi e quattro italiane, l'opera sulla balistica (1537) di Niccolò Fontana detto Tartaglia (1500 ca.-1557), i due trattati di ingegneria mineraria di Georg Bauer o Giorgio Agricola (1494-1555) che vengono pubblicati nel 1546 e nel 1556, il *Théâtre des instruments mathematiques et mechaniques* (1569) di Jacques Besson, le *Diverse et artificiose machine* (1588) di Agostino Ramelli (1531-1590), i *Mechanicorum libri* (1577) di Guidobaldo del Monte, i tre libri sulla meccanica di Simon Stevin o Stevinus (1548-1620), le *Machinae novae* (1595) di Fausto Veranzio (1551-1617), il *Novo teatro di machine et edificii* (1607) di Vittorio Zonca (1568-1602), i trattati di navigazione di Thomas Hariot (1560-1621) e di Robert Hues (1553-1632) rispettivamente pubblicati nel 1594 e nel 1599.

Le università e i conventi non sono più gli unici luoghi nei quali si produce e si elabora cultura. Nasce un tipo di sapere che ha a che fare con la progettazione di macchine, con la costruzione di strumenti bellici di offesa e di difesa, con le fortezze, i canali, le dighe, l'estrazione dei metalli dalle miniere. Coloro che elaborano questo sapere, gli ingegneri o gli artisti-ingegneri vengono assumendo una posizione di prestigio pari o superiore a quella del medico, del mago, dell'astronomo di corte, del professore universitario. Leon Battista Alberti è pittore, scultore, architetto, urbanista, si occupa di topografia, progetta un igrometro e strumenti per il metodo di sondaggio delle acque profonde. È un umanista raffinato, scrive una commedia in latino, una celebre opera *Della famiglia* e vari scritti di morale. Ritiene che la matematica (teoria delle proporzioni e teoria della prospettiva) sia il terreno comune all'opera dell'artista e a quella dello scienziato. La visione prospettica, che è propria del pittore, è una scienza ed è scienza la pittura. La «ragione» e la «regola» si congiungono con l'«opera» nel lavoro

dell'architetto e l'elogio dell'architetto si trasforma nell'esaltazione del lavoro dell'ingegnere che è in grado di traforare monti e di spostare enormi masse di acqua e di roccia, di prosciugare paludi, di regolare il corso dei fiumi, di costruire navi, ponti e macchine da guerra. I principi italiani, i re di Francia, gli zar di Russia, il re d'Ungheria Mattia Corvino chiamavano alle loro corti uomini capaci di risolvere problemi pratici diversi, di produrre opere d'arte. Il bolognese Ridolfo Fioravanti, detto Aristotele, risolve nella sua città problemi particolarmente difficili: raddrizza la torre del Palazzo del Podestà, nel 1455 sposta la torre della Chiesa della Magione pesante più di 400 tonnellate. Lavora al servizio di Francesco Sforza, del Duca di Mantova, del papa Paolo III, nel 1470 è alla corte di Mattia Corvino e cinque anni dopo presso lo zar di Russia. È ingegnere, fonditore, coniatore di monete, esperto di idraulica e di pirotecnia. Francesco di Giorgio Martini sovraintende al servizio delle acque e delle fontane della città di Siena, costruisce statue e cannoni, per i duchi di Urbino costruisce palazzi e fortezze, diviene un esperto di fortificazioni e si sposta per tutta Italia. Il suo *Trattato di architettura, ingegneria e arte militare* si ferma a lungo sulle fortificazioni, le piante delle città, i materiali da costruzione, i giardini, ma contiene anche numerosi progetti di macchine: turbine, seghe idrauliche, macchine elevatrici, battipali ecc.

2. *Le botteghe.*

Nel corso del Quattrocento, la mentalità e la posizione sociale degli artisti avevano subito modificazioni profonde. Come ci ha ricordato F. Antal, l'arte era considerata, nel Trecento, come un'attività manuale. All'artista si dava del tu come ai domestici. Nobili e cittadini benestanti avrebbero considerato umiliante la posizione dell'artista. Quasi tutti gli artisti del primo Quattrocento escono da ambienti artigiani, contadini e piccolo-borghesi. Andrea del Castagno è figlio di un contadino, Paolo Uccello di un barbiere, Filippo Lippi di un macellaio, i Pollaiolo (come indica il nome) di un venditore di polli. Nei primi anni del secolo scultori e architetti, a Firenze, erano membri della corporazione minore dei muratori e carpentieri, mentre i pittori erano classificati nella corporazione maggiore dei medici e speziali (come sottoposti dell'arte) assieme agli imbianchini e ai macinatori di colori. Dalle botteghe, nelle quali il tirocinio iniziava con lavori manuali (macinazione dei colori, preparazione delle tele ecc.), non uscivano solo quadri insigni, ma stemmi, bandiere, intarsi, modelli per tappezzieri e ricamatori, lavori in terracotta, oggetti di oreficeria. Gli architetti non erano solo costruttori di edifici, ma si occupavano di strumenti meccanici e di macchine da guerra, della preparazione dei palchi, delle «macchine» e di complicati apparati per le processioni e per le feste.

Il profondo «mutamento delle idee sull'arte» (un processo che è stato ampiamente analizzato in questi ultimi cinquanta anni) è legato al carattere sempre più profano della produzione artistica, al peso sempre maggiore dell'opinione dei laici, al lento passaggio degli artisti dal rango di artigiani a quello di «borghesi». Nell'età di Giorgio Vasari, alla metà del Cinquecento, incarichi di tipo artigianale già non appaiono più conciliabili con la dignità dell'artista. Carlo V si piega a raccogliere il pennello caduto a Tiziano: questo gesto, storico o leggendario che sia, è il simbolo del passaggio degli «artisti» ad un nuovo *status* sociale. Ma prima che la figura dell'artista venisse identificata con quella del «genio», autore di capolavori destinati a vita immortale, proprio nelle botteghe fiorentine del Quattrocento si era attuata, come forse mai era avvenuto in precedenza, la fusione di lavoro manuale e di teoria. Alcune botteghe (come ad esempio quella di Lorenzo Ghiberti durante la preparazione delle porte del Battistero) si trasformavano in veri e propri laboratori industriali. In queste botteghe, che sono anche officine, si formano i pittori e gli scultori, gli ingegneri, i tecnici, i costruttori e progettatori di macchine. Accanto all'arte di impastare i colori, di tagliare le pietre, di colare il bronzo, accanto alla pittura e alla scultura, vengono insegnati i rudimenti dell'anatomia e dell'ottica, della prospettiva e della geometria. La cultura degli «uomini senza lettere» deriva da un'educazione pratica che si richiama a fonti diverse, che conosce frammenti dei grandi testi della scienza classica, che si gloria di riferimenti a Euclide e Archimede. Il sapere empirico di personaggi come Leonardo ha alle spalle un ambiente di questo tipo.

3. *Leonardo da Vinci.*

Leonardo da Vinci (1452-1519), pittore e ingegnere, costruttore e progettatore di macchine, uomo «senza lettere» e filosofo, è diventato non ingiustamente, per i moderni, il simbolo dell'uomo dai molti saperi, del superamento dell'antica separazione fra arti meccaniche e arti liberali, fra pratica e teoria, fra le operazioni delle mani e quelle della mente. I suoi interessi giovanili sono legati alla consuetudine delle *botteghe* del Quattrocento e proprio dalla sua familiarità artigianesca con le caratteristiche dei materiali nasce la consapevolezza, che resta in lui sempre viva, della necessaria congiunzione della pratica con la teoria. Le scienze che «principiano e finiscono nella mente» non hanno verità, perché nei discorsi puramente mentali «non accade esperienza, senza la quale nulla dà di sé certezza». Ma è anche vero, reciprocamente, che non vi è certezza se non là dove si possono applicare le matematiche e che quelli che si innamorano della pratica senza la scienza «sono come i nocchieri che entrano in naviglio

senza timone o bussola». È del tutto senza senso rimproverare a Leonardo ambiguità o incertezze. Difendere, come egli faceva, la convergenza pratica-teoria voleva dire prendere di volta in volta posizione contro i sostenitori della pura teoria o contro quell'avversario che (per usare le parole stesse di Leonardo) «non vuole tanta scienza, perché gli basta la pratica». Iscritto alla corporazione dei pittori nel 1472, Leonardo resta fino al 1476 nella «bottega» del Verrocchio.

Nel 1482 Leonardo venne chiamato a Milano, da Ludovico Sforza, come scultore e fonditore. Dopo aver accettato dal conte di Ligny l'incarico di preparare un rapporto sulla difesa militare della Toscana deve abbandonare Milano, in seguito alla caduta dello Sforza, e rifugiarsi a Mantova. In quell'anno, il 1499, viene assunto in qualità di ingegnere militare dai Veneziani. Dopo un periodo di vita «errante» (durante il quale è anche a Firenze) entra, nel 1502, al servizio di Cesare Borgia, in qualità di ingegnere militare. In un quaderno di appunti (noto come il Manoscritto L) annota e disegna tutto ciò che lo interessa nei suoi continui spostamenti per l'Italia centrale. Caduto il Valentino, torna a Firenze nel 1503: è il periodo della *Gioconda* e dell'incompiuta *Battaglia d'Anghiari*. Il grandioso progetto di deviazione dell'Arno e di un porto a Firenze venne interrotto dalla guerra fra Firenze e Pisa. Nel 1506 è di nuovo a Milano, al servizio del re di Francia, e organizza le feste per l'entrata in Milano di Luigi XII. Resta a Milano fino al 1513 (che è l'anno del ritiro dei Francesi) e si trasferisce a Roma, al servizio di papa Leone X. Nel 1516 abbandona l'Italia e si trasferisce in Francia, invitatovi da Francesco I, e vi rimane fino alla morte in qualità di ingegnere, architetto, meccanico.

Si è giustamente parlato, soprattutto in relazione al secondo soggiorno milanese, di un progressivo spostamento del maturo Leonardo verso la teoria. Si può certo sottolineare il fatto che i complessi progetti leonardeschi di pompe, chiuse, raddrizzamento e canalizzazione dei corsi d'acqua nascono in questo periodo, ma non si può certo per questo, come molti hanno fatto, cercare nel pensiero di questo artista e letterato grandissimo l'atto di fondazione del metodo sperimentale e della nuova scienza della natura. Non a torto, dopo tanta insistenza sul «miracolo» Leonardo, si è ricordato il suo assoluto disdegno per la tipografia e per la stampa e si è sottolineato il fatto che la valutazione che fu data dei codici leonardeschi all'epoca della loro pubblicazione dipendeva dalla scarsa o nessuna conoscenza che si aveva allora dell'effettiva situazione del sapere scientifico del Cinquecento. La ricerca di Leonardo, che è straordinariamente ricca di balenanti intuizioni e di geniali vedute, non oltrepassa mai il piano degli *esperimenti curiosi* per giungere a quella sistematicità che è una delle caratteristiche fondamentali della scienza e della tecnica moderne. La sua indagine, sempre oscillante fra l'esperimento e la annotazione, appare come frantumata e polverizzata in una

serie di brevi note, di osservazioni sparse, di appunti scritti per sé medesimo in una simbologia spesso oscura e volutamente non trasmissibile. Sempre incuriosito da un problema particolare, Leonardo non ha alcun interesse a lavorare a un corpus sistematico di conoscenze e non ha la preoccupazione (che è anch'essa una dimensione fondamentale di ciò che chiamiamo tecnica e scienza) di trasmettere, spiegare e provare agli altri le proprie scoperte. Da questo punto di vista anche le innumerevoli, famose macchine progettate da Leonardo riacquistano le loro reali proporzioni e appaiono costruite, più che come strumenti per alleviare la fatica degli uomini e accrescere il loro potere sul mondo, in vista di scopi fuggitivi: feste, divertimenti, sorprese meccaniche. Leonardo, non per caso, è più preoccupato della *elaborazione* che della *esecuzione* dei suoi progetti. Quelle macchine rischiano continuamente di diventare «giocattoli», mentre il concetto di «forza» (sul quale si è tanto insistito) è certo più legato alla tematica ermetica e ficiniana dell'animazione universale che alla nascita della meccanica razionale.

E tuttavia non va dimenticato che si ritrovano di continuo, nei frammenti di Leonardo, affermazioni che torneranno a circolare con forza, in contesti diversi, entro la cultura dell'età moderna: l'idea di un necessario congiungimento fra la matematica e l'esperienza e le difficoltà di prospettarsi quel rapporto; la polemica fermissima contro le vane pretese dell'alchimia; l'invettiva contro «i recitatori e i trombetti delle altrui opere»; la protesta contro il richiamo alle autorità che è propria di chi usa la memoria invece che l'ingegno; l'immagine di una natura «che non rompe sue leggi», che è una catena mirabile e inesorabile di cause; l'affermazione che i risultati dell'esperienza sono in grado di «porre silenzio alle lingue de' litiganti» e all'«eterno gridore» dei sofisti. Sarebbe facile richiamare passi precisi: la «certezza che è data dagli occhi» e i «dottori di memoria» di Galileo Galilei, la sua immagine della natura «sorda ai nostri vani desideri» che produce i suoi effetti «con maniere inescogitabili da noi». E ancora: il rifiuto del sapere dei puri empirici da parte di Bacone, la sua immagine dell'uomo che è padrone della natura solo se è capace di obbedire alle sue leggi inesorabili.

L'immagine (che ha lungamente dominato) di una sorta di «infanzia della scienza» della quale Leonardo sarebbe l'espressione è senza dubbio da rifiutare. Ma anche la lunga insistenza sui mirabili «precorrimenti» e sul «miracolo» Leonardo andrà in qualche modo spiegata. Quella metafora dell'infanzia resta, su un piano diverso da quello dei «precorrimenti», ricca di suggestioni. Le grandi scelte che sono alla radice della scienza moderna (il matematismo, il corpuscolarismo, il meccanicismo) hanno condotto ciò che chiamiamo arte e ciò che chiamiamo scienza a seguire vie diverse, a muoversi secondo prospettive che tendono a divergere fortemente e a progressivamente allontanarsi. Tentare di ravvicinarle, di risaldarle insieme è un'impresa

che sembra non avere più alcun senso. I disegni e le pitture di Leonardo non sono però il semplice strumento di una ricerca scientifica che ha altrove la sua metodologia. Molti di quei disegni di rocce, piante, animali, nuvole, parti del corpo umano, volti, moti di arie e di acque sono essi medesimi «atti di conoscenza scientifica, ossia indagine critica sulla realtà naturale» (C. Luporini). I fogli di Leonardo che sono giunti fino a noi — i suoi appunti, i suoi disegni e quella irripetibile, straordinaria mescolanza di testi e di disegni — ci consentono di affacciarci come ad una soglia: a quegli uomini e a quell'ambiente in cui quell'avvicinamento, quella compenetrazione (per noi impossibile e illusoria) fra scienza e arte apparvero possibili, si configurarono come reali.

4. *La «fabrica» e il «discorso».*

I libri di macchine pubblicati in Europa fra la metà del Cinquecento e la metà del Seicento sono rivolti alla ricerca di soluzioni per i nuovi problemi posti dai rapidi sviluppi dell'arte mineraria, di quella militare, della metallurgia, della navigazione. Sarebbe vano cercare in questi scritti la piena consapevolezza dei radicali mutamenti che gli sviluppi del sapere tecnico portavano anche nel mondo della cultura. Non mancano tuttavia prese di posizione che hanno un rilievo preciso.

L'intento della *Pirotechnia* di Biringuccio (1540) è prevalentemente descrittivo e, in nome di una descrizione fedele e stilisticamente scarna, Biringuccio rifiuta ogni tentativo di abbellimento retorico. Giudica che gli alchimisti appartengano a quella categoria di persone che nascondono dietro «mille fabulette» la sostanziale ignoranza degli argomenti di cui trattano. Incapaci di una ricerca sui «mezzi», gli alchimisti guardano troppo lontano e non vedono «gli intermedi». A differenza di Biringuccio, Georg Bauer (Agricola) è uomo di vasta cultura e di molteplici interessi. Nato a Glachau, in Sassonia, nel 1494, studia a Lipsia, Bologna, Venezia. Nel 1527 comincia a esercitare medicina a Joachimstal (in Boemia), una zona che era allora una delle maggiori aree minerarie d'Europa. Borgomastro di Chemnitz, incaricato di varie missioni politiche presso l'imperatore Carlo e il re Ferdinando d'Austria, godette della stima di Erasmo e di Melantone. Il *De ortu et causis subterraneorum* e il *De natura fossilium* sono fra i primi trattati sistematici di geologia e di mineralogia. Il *De re metallica* pubblicato nel 1556, un anno dopo la morte del suo autore, restò per due secoli l'opera fondamentale di arte mineraria. Nel Potosì, che fornì oro e argento a tutta Europa, l'opera di Agricola sarà considerata una specie di Bibbia e fu attaccata agli altari delle chiese in modo che i minatori abbinassero la risoluzione di un problema tecnico a un atto di devozione. I dodici libri del trattato si occupano di tutti i

processi dell'estrazione e della fusione e trattamento dei metalli: dell'individuazione delle vene e della loro direzione, delle macchine e degli strumenti, dell'amministrazione, dell'assaggio dell'oro, delle fornaci. Ma nel libro è anche presente la consapevolezza di una seria crisi della cultura che nasce da un distacco dalle cose e da una degenerazione del linguaggio. «Io non ho scritto cosa niuna la quale non habbia veduta o letta o con accuratissima diligenza esaminata quando che da altrui mi sia stata raccontata»: su questa base egli critica severamente la voluta oscurità linguistica e la arbitrarietà terminologica degli alchimisti i cui libri sono «tutti scuri», perché quegli scrittori designano le cose con nomi «istrani et trovati di lor capo et chi l'uno et chi l'altro se n'è finto d'una stessa cosa».

Nel *De re metallica* Agricola difende infine l'arte dei metalli dall'accusa di essere «indegna e vile» nei confronti delle arti liberali. Per molti essa si configura come un lavoro servile «vergognoso e disonesto per l'uomo libero cioè per il gentiluomo honesto e honorevole». Ma il «metalliere», per Agricola, dovrà essere esperto nella individuazione dei terreni, delle vene, delle varie specie di pietre, gemme e metalli. Gli saranno necessarie la filosofia, la medicina, l'arte delle misure, l'architettura, l'arte del disegno, la legge e il diritto. Il lavoro dei tecnici non può andare disgiunto da quello degli scienziati. A chi, per sostenere la tesi opposta, si fonda sulla contrapposizione liberi-servi, Agricola risponde che anche l'agricoltura fu praticata un tempo dagli schiavi, che all'architettura contribuirono servi, che non pochi illustri medici furono schiavi.

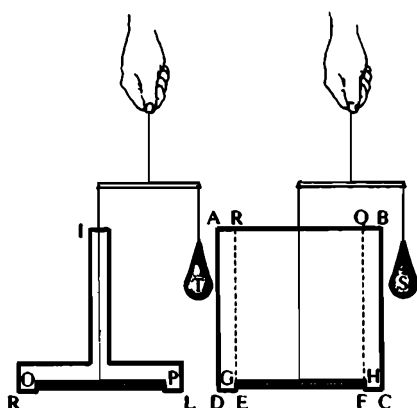
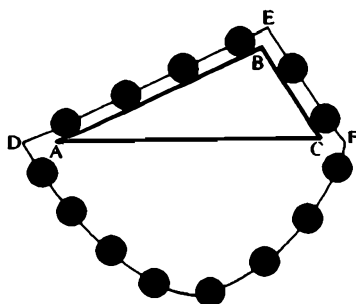
Nei *Mechanicorum libri* di Guidobaldo del Monte (1545-1607) pubblicati a Pesaro nel 1577 troviamo, fondata su argomenti non dissimili, questa stessa appassionata difesa: in molte parti d'Italia «si suole dire ad altrui mechanico per ischerno et villania, et alcuni per essere chiamati ingegnieri si prendono sdegno». Il termine meccanico indica invece un «uomo di alto affare, che sappia con le mani e col senno mandare ad esecutione opere meravigliose». Archimede fu principalmente un meccanico. L'essere meccanico o ingegnere «è officio da persona degna et signorile, et mechanico è voce greca significante cosa fatta con artificio et in generale comprende ciascun edificio, ordigno, strumento, argano, mangano overo ingegno maestrevolmente ritrovato et lavorato in qual si voglia scienza, arte et esercitio» (1581, Ai lettori).

Nel suo commento a Vitruvio (1556), Daniele Barbaro si era posto con molta chiarezza un problema: «Perché i pratici non hanno acquistato credito? percioché l'architettura nasce da discorso. Perché i letterati? percioché l'architettura nasce da fabrica... A essere architetto, che è un'artificiosa generatione, si ricerca il discorso e la fabrica unitamente» (1556, 57). L'unione effettiva di *discorso* e di *fabrica*, di *speculazione* e *manifattura* presentava in realtà problemi non indifferenti. Della loro

importanza si rese per esempio perfettamente conto un ingegnere come Bonaiuto Lorini che prestò servizio come ingegnere militare presso Cosimo dei Medici e presso la Repubblica di Venezia. In una pagina del suo trattato *Delle fortificationi* (1597) affronta il problema del rapporto fra il lavoro del «puro matematico speculativo» e quello del «meccanico pratico». Il matematico lavora con linee, superfici e corpi «immaginari et separati dalla materia». Le sue dimostrazioni «non rispondono così esquisitamente quando alle cose materiali si applicano» perché la materia con la quale opera il meccanico porta sempre con sé «impedimenti». Il giudizio e l'abilità del meccanico consiste nel saper prevedere le difficoltà e i problemi derivanti dalla diversità delle materie con le quali si deve operare. Su questo problema dei rapporti fra le «imperfezzioni della materia» e le «purissime dimostrazioni matematiche» si apriranno i *Discorsi intorno a due nuove scienze* di Galilei.

Una caratteristica mescolanza di modelli idealizzati e di considerazioni «fisiche», un richiamo insistente e diretto ad Archimede caratterizzano le ricerche di Simon Stevin (1548-1620), latinizzato in Stevinus (cfr. vol. I, cap. II e V), nato a Bruges e morto all'Aja. I suoi contemporanei furono sbalorditi da un carro a vele che egli costruì per il divertimento del principe d'Orange ed esibì sulla spiaggia di Scheveningen. Stevin scrive di aritmetica e geometria, si occupa di fortificazioni, progetta e costruisce macchine e mulini ad acqua, pubblica tavole per il calcolo degli interessi, si occupa nello scritto *De Thiende* (Il decimo, 1585) della notazione delle frazioni decimali e nell'opera *De Havenvinding* (1599) della determinazione della longitudine. Ritiene che l'olandese sia una delle più antiche lingue del mondo ed abbia pregi di concisione sconosciuti ad altre lingue. Si rivolge, sempre con grande cura per la chiarezza, ad un pubblico di artigiani. Per entrambe queste ragioni pubblica i suoi scritti in volgare. I tre libri dei *Beghinselen der Weeghconst* (Elementi dell'arte del pesare) pubblicati nel 1586, si richiamano nel titolo alla medioevale *scientia de ponderibus*. Tradotti in latino negli *Hypomnemata mathematica* (1605-1608), apparvero, nel 1634, anche in traduzione francese.

L'opera contiene, fra l'altro, anche la dimostrazione del cosiddetto paradosso idrostatico (che porta il nome di Pascal) per il quale la pressione esercitata da un fluido su un corpo solido in esso immerso non è proporzionale al volume del fluido in cui il corpo è immerso, ma alla dimensione della superficie sotto pressione e all'altezza della colonna di fluido che la sovrasta. Il problema della mancata frantumazione degli oggetti sul fondo marino era assai antico. Il recipiente ABCD ha sul fondo un'apertura rotonda EF coperta dal disco di legno GH. Il recipiente è riempito con acqua. Un secondo recipiente IRL della stessa altezza del primo e anch'esso riempito con acqua ha sul fondo un'apertura delle stesse

dimensioni della prima anch'essa ricoperta dal disco di legno OP che ha lo stesso peso del discho GH. Entrambi i dischi non tendono a galleggiare e, sottoposti alla stessa pressione, restano premuti contro le aperture. Le pressioni sono controbilanciate e i dischi appena sollevati da pesi uguali S e T che hanno lo stesso peso della colonna d'acqua ERQF sopra il disco GH (Wolf 1950, pp. 220-221).

Le condizioni di equilibrio di un corpo su un piano inclinato sono oggetto di una delle più celebri dimostrazioni del meccanico olandese: la cosiddetta «corona di sfere di Stevino». Si tratta, per usare la sua

espressione, di «un miracolo che tuttavia non è un miracolo». Una catena chiusa sulla quale sono attaccate a intervalli eguali 14 sfere dello stesso peso è appoggiata al triangolo ABC che ha la base parallela all'orizzonte e il cui lato

AB è il doppio di BC. La catena può scivolare sui tre punti fissi DEF disposti in ABC. Stevino parte dal presupposto che il moto perpetuo sia *fisicamente* impossibile e fa valere questa affermazione in un contesto matematico e idealizzato nel quale non si tiene conto né dell'attrito delle sfere sul piano, né della resistenza dell'aria, né della massa della catena o corda ecc. Data la impossibilità del moto perpetuo (che si verificherebbe ove ciascuna sfera prendesse il posto di quella che la precede) la catena è necessariamente in equilibrio e tale equilibrio non verrà disturbato rimuovendo la parte della catena situata al di sotto della base AC. Su piani inclinati della stessa altezza una forza data può sostenere un peso proporzionale alla lunghezza del piano.

Con l'aiuto del suo amico Johan Cornets de Groot (il padre del celebre giurista Ugo Grozio), Stevino eseguì anche un esperimento tendente a falsificare la tesi aristotelica relativa alla proporzionalità inversa fra il tempo necessario ad un corpo in caduta libera (a partire dalla quiete) per percorrere una determinata distanza e il suo peso.

5. *La dignità delle arti meccaniche.*

Alla discussione sulle arti meccaniche, che raggiunse una straordinaria intensità fra la metà del Cinquecento e la metà del Settecento, sono legati alcuni grandi temi della cultura europea. Nelle opere degli artisti e degli sperimentatori, nei trattati degli ingegneri e dei tecnici si fa strada una nuova considerazione del lavoro, della funzione del sapere tecnico, del significato che hanno i processi artificiali di alterazione e trasformazione della natura. Anche sul piano della filosofia emerge lentamente una valutazione delle *arti* assai diversa da quella tradizionale: alcuni dei procedimenti dei quali fanno uso tecnici e artigiani per modificare la natura giovano alla conoscenza della realtà naturale, valgono anzi a mostrare (come verrà detto in esplicita polemica con le filosofie tradizionali) la «natura in movimento».

La difesa delle arti meccaniche dalla accusa di «indegnità», il rifiuto di far coincidere l'orizzonte della cultura con quello delle arti liberali e le operazioni pratiche con il lavoro servile, implicavano in realtà l'abbandono di un'antica immagine della scienza: come disinteressata contemplazione della verità, come ricerca che nasce solo *dopo* che si sono apprestate le cose necessarie alla vita. Quest'ultima è una tesi aristotelica. Alla polemica contro gli aristotelici si unisce spesso l'altra, largamente diffusa entro la letteratura tecnica, rivolta contro ogni forma di sapienza occulta e segreta, contro l'antichissima concezione sacerdotale del sapere. Gli uomini che operavano nelle officine, negli arsenali, nelle botteghe giunsero a teorizzare fini e scopi del loro lavoro. A differenza degli artigiani e dei meccanici dell'antichità e del Medioevo, i tecnici e gli ingegneri della nascente età moderna scrissero e

pubblicarono libri, tentarono di misurarsi polemicamente con la tradizione, contrapposero il loro tipo di sapere e di approccio alla realtà naturale a quelli teorizzati e praticati nelle università.

Nell'avvertimento ai lettori, premesso ai suoi *Discours admirables*, pubblicati a Parigi nel 1580, Bernard Palissy, il celebre ceramista francese, inveiva contro i professori della Sorbona e si poneva una domanda caratteristica: è possibile che un uomo possa giungere alla conoscenza degli effetti naturali senza aver letto libri scritti in latino? Palissy era un apprendista vetraio che, cercando il segreto dello smalto bianco da applicare alle ceramiche, era giunto alla celebrità e poi sull'orlo della rovina. Nella sua vita avventurosa aveva progettato numerose macchine che non riuscì mai ad eseguire; aveva rischiato più volte di morire di fame e di essere condannato a morte. Morì alla Bastiglia nel 1589 o 1590. Alla domanda che si era posto Palissy rispondeva affermativamente: la pratica può mostrare che le dottrine dei filosofi (anche i più antichi e rinomati) possono essere false in più punti: il laboratorio e museo di storia naturale che Palissy ha costruito può insegnare più filosofia di quanta non se ne possa apprendere dalla lettura degli antichi filosofi. Palissy non era un uomo colto, era un artigiano che aveva letto Vitruvio e qualche trattato di Paracelso e di Cardano. In lui troviamo, portata fino alle estreme conseguenze, la tesi che il libro della natura sia straordinariamente più complesso di qualsiasi altro libro.

Robert Norman (fl. ca. 1560-1596) è un marinaio inglese che, dopo circa vent'anni trascorsi in mare, si dedica alla costruzione e al commercio delle bussole (cfr. cap. I). Un anno dopo la pubblicazione dei *Discours* di Palissy, pubblica a Londra (nel 1581) un volumetto intitolato *The new attractive, containing a short discourse of the Magnes or Lodestone*, un testo sul magnetismo e la declinazione dell'ago magnetico che verrà utilizzato da William Gilbert. Norman qualifica se stesso un «matematico non istruito» che ha raccolto una grandissima quantità di informazioni nel corso della sua professione. Ha deciso di rischiare il suo buon nome e di sfidare le calunnie degli avversari per proporre alla considerazione del mondo i risultati del suo lavoro. Intende operare per la gloria di Dio e il vantaggio dell'Inghilterra. Il lettore dovrà tener sempre presente che egli è un semplice marinaio, incapace di «sostenere una disputa con i logici» o di dare una spiegazione soddisfacente delle cause del magnetismo terrestre. Nonostante la sua cautela e il suo atteggiamento di rispetto verso la cultura dei dotti, Norman ha anche il senso di una opposizione di fondo fra le sue ricerche e quelle degli «uomini di libri» che non mostrano di apprezzare il lavoro dei meccanici. Stando in mezzo ai loro libri, costoro elaborano concetti molto raffinati e vorrebbero che tutti i meccanici fossero costretti a consegnare a loro tutte le loro conoscenze e i loro concetti, ma per fortuna, conclude Norman, «esistono in

questo paese molti meccanici che conoscono alla perfezione l'uso delle loro arti e sono in grado di applicarle ai loro diversi scopi altrettanto efficacemente di coloro che vorrebbero condannarli».

Idee di questo tipo penetrano rapidamente anche nel mondo dei dotti. In un filosofo come Juan Luis Vives (1492-1540), amico di Erasmo e di Tommaso Moro, precettore alla corte inglese, uomo di raffinata cultura che scrive per il pubblico degli umanisti, troviamo espressi con minore ingenuità, ma con altrettanta energia questi stessi concetti. Nel *De tradendis disciplinis* (1531) Vives invita gli studiosi europei a porgere seria attenzione ai problemi relativi alle macchine, alla tessitura, all'agricoltura, alla navigazione. Vincendo il suo tradizionale disdegno, l'uomo di lettere deve entrare nelle officine e nelle fattorie, porre domande agli artigiani, cercare di rendersi conto dei dettagli del loro lavoro. La scienza della natura, scriveva nel *De causis corruptarum artium* (1531), non è monopolio dei filosofi e dei dialettici. Meglio di essi la conoscono i meccanici che non si sono mai costruiti entità immaginarie come le ecceità o le formalità.

A livelli culturali differenti e con differenti intenzioni, Palissy, Norman, Vives danno dunque espressione all'esigenza di un sapere nel quale l'attenzione per le opere e la ricerca empirica fossero preminenti rispetto alle evasioni retoriche, alla logica come puro gioco intellettuale. Questa stessa esigenza (come vedremo) sarà presente in uno dei grandi testi della nuova scienza: il *De corporis humani fabrica* (1543) di Andrea Vesalio. Vesalio prenderà in essa energicamente posizione contro la figura di un medico il cui sapere si risolve in parole e di un sezionatore abbassato al rango di macellaio.

I testi ora ricordati risalgono al cinquantennio compreso fra il 1530 e il 1580. Negli scritti di un artigiano parigino, di un marinaio inglese, di un filosofo spagnolo, di uno scienziato fiammingo legato alla tradizione culturale italiana sono presenti temi comuni: i procedimenti degli artigiani, degli artisti, degli ingegneri hanno valore ai fini del progresso del sapere. Ad essi va riconosciuta la dignità di fatti culturali. Per aver chiaro il significato di queste prese di posizione gioverà rendersi conto che esse non sono affatto rivolte solo contro il passato o la tradizione. Per molti secoli il disprezzo che si prova per chi esercita attività manuali era stato «trasferito» a quell'attività che era apparsa ultima nella scala dei valori sociali ed esclusa da quelli culturali. Questi concetti sono vivi fino in pieno Seicento ed oltre. L'ingegnere diventerà un eroe positivo solo nell'Ottocento. Per persuadersene basta pensare allo scandalo dei Gesuiti francesi di fronte alle troppe voci di argomento tecnico presenti nell'*Encyclopédie* di Diderot o aprire il *Dictionnaire français* del Richelet (1680) alla voce *mécanique*: «questo termine significa ciò che è contrario a liberale e onorevole, ha significato di basso, villano, poco degno di una persona onesta». Il giurista Charles Loyseau dava

espressione a convinzioni diffuse quando affermava, nel 1613, che «viene comunemente chiamato meccanico ciò che è vile e abbietto».

6. *Le origini dell'idea di progresso.*

L'appello alla natura e all'esperienza, l'insistenza sulla necessità delle osservazioni, la valutazione dell'efficacia delle astrazioni non implicano affatto, in quanto tali, l'adesione alla immagine di una scienza che abbia carattere pubblico, che sia fondata sulla collaborazione e sulla pubblicità dei risultati: che sia cioè costituita da una serie di contributi individuali, organizzati nella forma di un discorso sistematico, offerti in vista di risultati che possano essere (almeno potenzialmente) patrimonio di tutti.

L'immagine moderna della scienza alla quale ci si è ora riferiti gioca un ruolo decisivo e determinante nella formazione dell'idea di progresso. Essa implica infatti: 1) la convinzione che il sapere scientifico sia qualcosa che aumenta e che cresce, che si attua mediante un processo al quale danno il loro contributo, l'una dopo l'altra, differenti generazioni; 2) la convinzione che questo processo non sia mai, in una qualunque delle sue tappe, completo: cioè non più bisognoso di successive aggiunte o revisioni o integrazioni; 3) infine la convinzione che si dia in qualche modo una tradizione scientifica entro la quale si collocano i contributi degli individui. Se è vero che l'immagine moderna della scienza ha un ruolo essenziale nella formazione dell'idea di progresso, è altrettanto vero che l'idea di progresso non è marginale, ma costitutiva dell'immagine moderna della scienza. Dai primi anni del Seicento fino ad oltre la seconda metà dell'Ottocento, l'idea di una crescita, di un avanzamento del sapere accompagna tutti i vari e differenti programmi scientifici, ne costituisce, per così dire, lo sfondo comune.

Negli scritti degli artisti e degli sperimentatori del Quattrocento e poi nei trattati di ingegneria mineraria, di arte della navigazione, di balistica, di arte delle fortificazioni del secolo successivo, si fa strada non solo (come abbiamo visto) una nuova considerazione del lavoro manuale e della funzione culturale delle arti meccaniche, ma si afferma anche l'immagine alla quale ci si è sopra riferiti della scienza come costruzione progressiva e come una serie di risultati che si collocano, l'uno dopo l'altro, ad un livello di complessità o di «perfezione» sempre maggiore.

Anche da questo punto di vista il sapere dei tecnici si costruisce come una grande alternativa storica al sapere dei maghi e all'ideale di sapienza che è caratteristico della tradizione ermetica. Al mondo inteso dal mago come unità e continuità, all'immagine magica dell'universo come una grande catena sembra corrispondere una visione della storia come realtà unitaria,

continua e ripetitiva. Dal punto di vista della natura come un Tutto unitario e della storia umana come una Totalità unitaria, i sapienti hanno sempre continuato ad affermare, nel corso dei millenni, quelle stesse verità che a pochi è stato concesso di attingere. La verità non emerge dalla storia e dal tempo: è la perenne rivelazione di un *logos* eterno. La storia è un tessuto solo apparentemente vario: in essa è presente una sola immutabile *sapientia*.

Nelle opere dei meccanici questa prospettiva appare rovesciata. Le arti meccaniche — scrive Agostino Ramelli nella prefazione alle *Diverse et artificiose macchine* (1588) — nacquero dai bisogni e dalla fatica dei primi uomini impegnati a difendere la loro vita in un ambiente ostile. Il loro successivo sviluppo non assomiglia al moto impetuoso dei venti che sommergono le navi nel mare e poi indeboliscono fino a svanire. Assomiglia invece al corso dei fiumi che nascono piccoli e arrivano al mare grandi e poderosi e arricchiti dalle acque dei loro affluenti. Nella dedica premessa al *Trattato sulle proporzioni del corpo umano* (1528) Dürer aveva chiarito le ragioni per le quali, pur non essendo uno studioso, aveva osato affrontare un tema così alto. Ha deciso di pubblicare il libro, rischiando la maldicenza, per il pubblico beneficio di tutti gli artisti e per indurre altri a fare lo stesso «in modo che i nostri successori possano avere qualcosa da perfezionare e da far progredire». Il chirurgo parigino Ambroise Paré (1510-1599), ignaro di latino ed autodidatta, inviso alla Facoltà, afferma che non bisogna riposare sulle fatiche degli antichi «perché ci sono più cose da trovare di quante se ne siano finora trovate... e perché le arti non sono mai così perfette che non si possano fare ad esse delle aggiunte».

Filosofi come Bacon, Descartes, Boyle porteranno al livello della consapevolezza filosofica — inserendole in contesti teorici di grande rilievo — idee che erano nate in ambienti non filosofici, ambienti considerati con ostilità, quando addirittura non con disprezzo, dalla cultura che si esprimeva nelle università.

7. *Storia della natura e storia delle arti.*

Va certo abbandonata (come si è visto) l'immagine positivistica di Bacone come «fondatore della scienza moderna». Ma resta del tutto vero che egli si rende interprete di alcune esigenze fondamentali della cultura del suo tempo e porta a livello filosofico temi e idee che si erano andati affermando ai margini della scienza ufficiale, in quel mondo di tecnici, costruttori, ingegneri dei quali avevano fatto parte uomini come Biringuccio ed Agricola. La valutazione baconiana delle arti meccaniche è fondata su tre punti: 1) esse servono a rivelare i processi della natura, sono una forma di conoscenza; 2) le arti meccaniche crescono su sé medesime, sono, a differenza di tutte le

altre forme del sapere tradizionale, un sapere progressivo, e crescono così velocemente «che i desideri degli uomini vengono a mancare prima ancora che esse abbiano raggiunto la perfezione»; 3) nelle arti meccaniche, a differenza che nelle altre forme della cultura, vige la collaborazione, esse sono una forma di sapere collettivo: «in esse confluiscono gli impegni di molti, mentre nelle arti liberali gli ingegni di molti si sottoposero a quello di una sola persona ed i seguaci, per lo più, lo depravarono invece di farlo progredire».

Il progetto di una *storia meccanica* o storia delle arti fu per la prima volta formulato nell'*Advancement of learning* del 1605 e poi ripreso, con ampiezza maggiore, nella *Parasceve ad historiam naturalem et experimentalem* (pubblicata nel 1620 in appendice al *Novum Organum*) e, infine, nel *De degnitate et augmentis scientiarum* del 1623. La storia della natura va congiunta (questa l'idea centrale) alla storia degli esperimenti compiuti dall'uomo sulla natura. La storia delle arti è da collocare fra i *desiderata* della nuova enciclopedia delle scienze. Nelle scarse trattazioni esistenti «sono stati trascurati e respinti gli esperimenti familiari e volgari che invece servono all'interpretazione della natura quanto quelli già noti». Sembra che la cultura subisca un disonore «se gli uomini dotti si abbassano alla considerazione delle cose meccaniche». E invece la storia delle arti potrà rivelarsi come una fiaccola luminosa atta a favorire l'indagine sulle cause delle cose». Nell'ultimo periodo della sua vita, Bacone subordinò al progetto di una storia della natura e delle arti il progetto stesso della sua nuova logica.

I metodi, i procedimenti, le operazioni, il linguaggio delle arti meccaniche si sono affermati e perfezionati al di fuori della scienza ufficiale. L'avanzamento del sapere e il progresso delle condizioni di vita dell'uomo sulla terra richiedono per Bacone che il sapere dei tecnici venga inserito nel campo (ad esso precluso da una millenaria tradizione) della scienza e della filosofia naturale. Quei metodi, quei procedimenti, quei linguaggi devono diventare oggetto di riflessione e di studio. Non si tratta di pregiudizi di singoli intellettuali: le accademie, le società scientifiche, i sovrani devono porsi alla testa di questo moto di rinnovamento. Solo per questa via la *experientia erratica* dei meccanici, lo sparso insieme di ricerche o di osservazioni degli artigiani, le quotidiane fatiche di coloro che trasformano la natura mediante l'opera delle mani potranno essere sottratte al caso e alle ambiguità della magia, dar luogo a un grandioso e sistematico corpus di conoscenze.

Anche nell'opera di Descartes riscontriamo del tutto abbandonata l'antica condanna delle arti meccaniche. Nel testo delle *Regulae ad directionem ingenii* (composto fra il 1619 e il 1628) troviamo presente l'affermazione che il nuovo metodo imita quello delle arti meccaniche che dicono esse medesime in qual modo si debbono fabbricare i loro strumenti. Il riferimento

ai «mestieri dei nostri artigiani» ricompare anche nella sesta parte del *Discours*, là ove Cartesio auspica l'invenzione di un'infinità di artifici capaci di trasformare la vita e si richiama alla tesi baconiana di una «filosofia pratica» capace di rendere l'uomo quasi padrone e possessore della natura.

Alla realizzazione del grandioso progetto di Bacone lavorarono in Inghilterra, dopo il 1640, diversi gruppi di intellettuali. Uno di questi gruppi, che ha fra i suoi *leaders* Robert Boyle, nacque dall'incontro dei futuri membri del *Philosophical College*. Da questi incontri che si effettuarono in un secondo tempo ad Oxford prese vita, nel 1660, la Royal Society che ebbe fra i suoi primi progetti quelli di compilare fedeli resoconti di tutte le opere della natura e dell'arte e di studiare gli esperimenti effettuati nell'ambito di tutte le arti manuali (*manual trades*). A tutti i membri della Società si richiedeva «un modo di parlare discreto, nudo, naturale; sensi chiari; la capacità di portare tutte le cose il più vicino possibile alla chiarezza della matematica; una preferenza per il linguaggio degli artigiani, dei contadini, dei mercanti piuttosto che per quello dei filosofi». I *virtuosi* inglesi del Seicento sono l'espressione di una società che vede rapidamente aumentare il suo benessere a causa dei rapidi miglioramenti della tecnica. Nel progetto di un *gymnasium mechanicum* avanzato da William Petty nel 1648 ritroviamo presenti tutti gli elementi che caratterizzano la nascente *filosofia sperimentale*: la polemica contro la cultura libresca; la riaffermazione della inscindibilità fra scienza e tecnica; il progetto di una completa storia delle arti; la speranza in una meravigliosa fioritura di nuove scoperte.

Il libro della natura, l'officina degli artigiani, la sala anatomica vennero più volte contrapposte da Robert Boyle (1627-1691) alle biblioteche, agli studi dei letterati e degli umanisti, alle ricerche puramente teoriche: la sua polemica sfiora in più casi una sorta di primitivismo scientifico. Nelle *Considerations touching the usefulness of experimental natural philosophy* (1671), Boyle dà forma coerente e compiuta agli interessi e alle aspirazioni dei gruppi baconiani. Gli esperimenti compiuti dai virtuosi nei loro laboratori hanno notevoli pregi di accuratezza, ma negli esperimenti compiuti dagli artigiani nelle loro officine, il difetto di una minore accuratezza è compensato da una maggiore diligenza. Il quarto dei saggi che compongono le *Considerations* ha un titolo molto significativo: «i beni dell'umanità possono essere grandemente accresciuti dall'interesse dei filosofi naturali per i mestieri».

L'idea, già presente in Bacone, di una luce portata alle teorie dal lavoro dei meccanici è espressa con molta chiarezza, in riferimento all'opera di Galilei e di Harvey, da Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716). In uno scritto che tradisce fino dal titolo una precisa ispirazione baconiana (gli *Initia et specimina scientiae novae generalis pro instauratione et augumentis*

scientiarum ad publicam felicitatem) Leibniz afferma che i progressi realizzati nelle arti meccaniche sono ancora in gran parte ignorati dagli uomini colti. Da un lato i tecnici sono all'oscuro degli usi che possono essere fatti dei loro esperimenti, dall'altro gli scienziati e i teorici ignorano che molti loro *desiderata* potrebbero essere soddisfatti dal lavoro dei meccanici. Il programma di una storia delle arti veniva ripreso con maggiore ampiezza nel *Discours touchant la méthode de la certitude et l'art d'inventer*: le conoscenze non scritte e non codificate, disperse fra gli uomini che svolgono attività tecniche di varia natura superano di gran lunga, per quantità e per importanza, tutto ciò che si trova scritto nei libri. La parte migliore del tesoro di cui dispone la specie umana non è stata ancora registrata. Non esiste d'altra parte un'arte meccanica tanto *méprisable* che non possa offrire osservazioni e materiali di primaria importanza per la scienza. Ci occorre un vero e proprio *teatro della vita umana* ricavato dalla pratica degli uomini perché se una sola delle arti andasse smarrita a ciò non potrebbero rimediare tutte le nostre biblioteche. Il *mettere per iscritto* i procedimenti degli artigiani e dei tecnici apparve a Leibniz uno dei compiti più urgenti della nuova cultura.

Nelle pagine premesse da Jean d'Alembert (1717-1783) alla grande *Encyclopédie ou dictionnaire raisonné des sciences, des arts et des mestiers* (1751) è presente la consapevolezza che quella grande impresa portava a compimento un programma che aveva origini storiche precise. Nella enciclopedia di William Chambers, scriveva d'Alembert, abbiamo trovato per quanto riguarda le arti liberali una parola dove occorrevano molte pagine, ma abbiamo trovato tutto da fare di nuovo nelle arti meccaniche. Chambers ha solo letto dei libri, non ha mai visto degli artigiani e vi sono cose che si imparano solo nelle officine. Nel *Prospectus* del 1750, Denis Diderot (1713-1784) aveva espresso la stessa esigenza di cogliere dal vivo quei metodi di lavoro: «Ci si è rivolti ai più abili operai di Parigi e dell'intera Francia, ci si è presi la briga di andare nelle loro officine, di interrogarli, di scrivere sotto la loro dettatura, di sviluppare i loro pensieri, di trarre i termini propri della loro professione, di compilarne delle tavole, di definirli...» (*Œuvres*, XIII, 140). Nella voce *Art*, Diderot rilevava i cattivi effetti derivanti dalla tradizionale distinzione delle arti in liberali e meccaniche. Ne è nato il pregiudizio che «il volgersi agli oggetti sensibili e materiali» costituisca «una deroga alla dignità dello spirito». Ma questo pregiudizio, continuava, «ha riempito le città di orgogliosi ragionatori e di contemplatori inutili e le campagne di piccoli tiranni ignoranti, oziosi e disdegnosi». La polemica in difesa delle arti meccaniche si saldava al grande tema della eguaglianza politica.

8. *La tecnica, il progresso, la salvezza.*

La cultura del tardo illuminismo e del positivismo (Condorcet, Saint-Simon, Comte) trasformerà la nozione baconiana dell'*advancement of learning* o della crescita del sapere in una vera e propria teoria del progresso. In quel contesto: il progresso si configura come un ordine provvidenziale immanente alla storia, come una vera e propria legge storica; il progresso della scienza e della tecnica viene identificato con il progresso morale e politico e si tende a far dipendere il secondo dal primo; si tende infine a vedere nella competizione o nella «lotta» un elemento costitutivo del progresso (Spencer, darwinismo sociale). Proiettare la *nostra* immagine del progresso sui cosiddetti padri fondatori della scienza moderna conduce a risultati molto discutibili. Tutte le affermazioni sopra elencate sono completamente estranee al mondo culturale al quale, in questo capitolo, si è fatto riferimento.

La crescita del sapere appare ai grandi esponenti della cultura del Seicento qualcosa di provvisorio che la storia futura può cancellare o smentire. Quando elenca le «ragioni di speranza» che si possono nutrire per il rifiorire delle scienze e il rinnovamento della vita umana, Bacone ritiene sia opportuno adottare una regola caratteristica della politica: diffidare per principio e supporre sempre il peggio. Quando elenca in sette aforismi i motivi che possono spingere gli uomini a sperare in un futuro migliore, li qualifica come «le ragioni che debbono preservarci dalla disperazione». Per quanto concerne il futuro, la sua conclusione assomiglia più a quella di un esploratore che a quella di un assertore del progresso come portato inevitabile della storia: anche «se dal nuovo continente spirasse un'aura di speranza molto più debole, abbiamo deciso che la prova va egualmente tentata, se non vogliamo essere vili».

Bacone è stato presentato innumerevoli volte come l'entusiasta assertore della tecnica o, addirittura, come il padre spirituale del «tecnicismo neutro» che caratterizzerebbe tutta la cultura moderna. È vero esattamente il contrario. Esistono nella letteratura del Seicento ben poche pagine sul carattere ambiguo della tecnica che possano essere paragonate a quelle scritte dal Lord Cancelliere nella interpretazione (che risale al 1609) del mito di *Daedalus sive mechanicus*. La figura di Dedalo è quella di un uomo ingegnosissimo ma esecrabile. Il suo nome è soprattutto celebrato per le «illecite invenzioni»: la macchina che permise a Pasife di accoppiarsi con un toro e di generare il Minotauro divoratore di giovani; il Labirinto escogitato per nascondere il Minotauro e per «proteggere il male con il male». Dal mito di Dedalo si ricavano conclusioni di carattere generale: le arti meccaniche generano aiuti per la vita e, insieme, «strumenti di vizio e di morte». Il sapere

tecnico, agli occhi di Bacone, ha questo di caratteristico: mentre si pone come possibile produttore del male e del negativo, offre, insieme e congiuntamente a quel negativo, la possibilità di una diagnosi del male e di un rimedio al male. Dedalo costruì anche «rimedi per i delitti». Fu autore dell'ingegnoso espediente del filo capace di sciogliere i meandri del Labirinto: «Colui il quale ideò i meandri del Labirinto, ha mostrato anche la necessità del filo. Le arti meccaniche sono infatti di uso ambiguo e possono nel contempo produrre il male e offrire un rimedio al male» (*Scritti*, 1975, 482-83).

Per gli esponenti della rivoluzione scientifica la restaurazione del potere umano sulla natura, l'avanzamento del sapere hanno valore solo se realizzati in un più ampio contesto che concerne la religione, la morale, la politica. La «teocrazia universale» di Tommaso Campanella, la «carità» di Francis Bacon, il «cristianesimo universale» di Leibniz, la «pace universale» di Comenio non sono separabili dai loro interessi e dai loro entusiasmi per la nuova scienza. Costituiscono altrettanti ambiti entro i quali il sapere scientifico e tecnico deve operare per funzionare come strumento di riscatto e di liberazione. Per Bacone e per Boyle, come per Galilei, Descartes, Keplero, Leibniz e Newton la volontà umana e il desiderio di dominio non costituiscono il principio più alto. La natura è, contemporaneamente, oggetto di dominio e di reverenza. Essa va «torturata» e piegata a servizio dell'uomo, ma essa è anche «il libro di Dio» che va letto in spirito di umiltà.

9. *Tecnici e teorici nella rivoluzione scientifica.*

Sul rapporto fra tecnica e scienza, fra il sapere degli artigiani e degli ingegneri e quello dei teorici, in relazione alla cosiddetta rivoluzione scientifica, si è discusso moltissimo. Non è affatto vero (come ha sottolineato con forza Alexandre Koyré) che la teoria conduca direttamente alla pratica, né che la pratica generi direttamente la teoria. Non furono gli arpenodapti egiziani, che dovevano misurare i campi della valle del Nilo, a inventare la geometria, ma i Greci che non dovevano misurare nulla. Non furono i bisogni della navigazione, del computo ecclesiastico a incitare Copernico a rovesciare l'ordine delle sfere celesti e a porre il Sole al centro dell'universo (Hall, 1962). L'apparizione del cannone non provocò la nascita della nuova dinamica e la fisica di Galilei non è un epifenomeno dell'arsenale dei Veneziani.

L'immagine del nuovo scienziato del Seicento come «una sorta di ibrido fra il vecchio filosofo naturale e l'artigiano» è senza dubbio troppo facile. Ed è vero che Copernico, Vesalio e Descartes non erano certo più simili a un artigiano di quanto non lo fossero Tolomeo, Galeno, Aristotele (Hall, 1962).

Ma è anche vero che Descartes fa riferimento alle arti meccaniche in modo molto diverso da Aristotele e che Vesalio scrisse pagine famose sui danni derivanti alla medicina dalla separazione fra il lavoro delle mani e l'elaborazione delle teorie.

Relativamente a questo problema andranno tenute presenti due considerazioni: 1) non serve molto teorizzare, in generale, sul carattere *attivo* della funzione esercitata dai teorici e sul carattere *passivo* di quella esercitata dagli artigiani; non ha infatti molto senso far riferimento alla «scienza» come ad una realtà unitaria e mettere sullo stesso piano l'astronomia che possiede da molti secoli una struttura teorica altamente organizzata e la chimica dello stesso periodo storico, che non ha alle spalle una tradizione chiaramente definita e nel cui ambito, agli inizi del mondo moderno, le conoscenze dei tecnici sono enormemente più avanzate di quelle dei filosofi naturali; 2) resta indubbio che i grandi progressi della tecnica empirica non solo attirarono l'attenzione degli scienziati e dei filosofi naturali ma li condussero ad accettare, come elemento fondamentale e costitutivo della loro immagine della scienza, quella volontà di sottomissione della natura agli scopi dell'uomo che era stata una delle caratteristiche della magia e che si era fatta strada con forza nell'opera dei meccanici e degli empirici del Cinquecento.

Siamo troppo abituati all'esistenza di manuali specializzati dedicati ad ogni possibile tipo di arte e di tecnica per renderci conto di quanto sia stata complicata e difficile la strada che condusse alla loro emergenza nella storia. Portare alla luce tutto ciò che Leibniz aveva chiamato «l'esperienza non registrata» del genere umano: in questa sua impresa Diderot si sentì un nuovo Socrate. Figlio di un coltellinaio egli fu, da questo punto di vista, veramente l'erede non solo di Bacone, di Galilei, di Cartesio, ma anche di quei «meccanici» come Biringuccio, Agricola, Norman e Palissy che avevano grandemente contribuito, due secoli prima, a mettere in crisi una veneranda immagine della scienza che risaliva alla Grecia.

BIBLIOGRAFIA

Testi

G. Agricola, *De l'arte de' metalli*, trad. di M. Florio, Basileae, 1563.
D. Barbaro, *I dieci libri dell'architettura di Vitruvio tradotti e commentati*, Venezia, 1556.
V. Biringuccio, *De la Pirotechnia*, Venezia, 1540.
D. Diderot, *Œuvres complètes*, Paris, 1875-77.
Guidobaldo del Monte, *Le Mechaniche*, trad. di F. Pigafetta, Venezia, 1581.
B. Palissy, *Œuvres*, Paris, 1880.

Studi

F. ALESSIO, *La filosofia e le artes mechanicae nel secolo XII*, in «Studi Medievali», 1965, pp. 72-161.
E. BELLONE e P. ROSSI (a cura di), *Leonardo e l'età della ragione*, Milano, Scientia, 1982.
M. BLOCH, *Lavoro e tecnica nel Medioevo*, Bari, Laterza, 1959.
F. BORKENAU, *La transizione dall'immagine feudale all'immagine borghese del mondo· la filosofia nel periodo della manifattura*, Bologna, Il Mulino, 1984.
J. BURY, *Storia dell'idea di progresso*, Milano, Feltrinelli, 1964.
D.S.L. CARDWELL, *Tecnologia, scienza, società*, Bologna, Il Mulino, 1976.
C. CIPOLLA, *Le macchine del tempo l'orologio e la società*, Bologna, Il Mulino, 1981.
R. FOSTER JONES, *Antichi e moderni*, Bologna, Il Mulino, 1980.
F. GILLE, *Leonardo e gli ingegneri del Rinascimento*, Milano, Feltrinelli, 1972.
A.R. HALL, *The Scholar and the Craftsman in the Scientific Revolution*, in M. CLAGETT (a cura di), *Critical Problems in the History of Science*, Madison, The University of Wisconsin Press, 1962, pp. 3-24.
D.S. LANDES, *Storia del tempo: l'orologio e la nascita del mondo moderno*, Bologna, Il Mulino, 1981.
W. LEISS, *Scienza e dominio*, Milano, Longanesi, 1976.
H. LEVIN, *The myth of the golden age in the Renaissance*, London, Faber and Faber, 1969.
C. LUPORINI, *La mente di Leonardo da Vinci*, Firenze, Sansoni, 1953.
J.U. NEF, *The conquest of the material world*, Chicago, The University of Chicago Press, 1964.
ID., *L'origine della civiltà industriale e il mondo contemporaneo*, Milano, Giuffré, 1968.
P. ROSSI, *I filosofi e le macchine 1400-1700*, Milano, Feltrinelli, 1971.
P.M. SCHUHL, *Machinisme et philosophie*, Paris, Vrin, 1947.
CH. SINGER, E.J. HOLMYARD, A.R. HALL, T.J. WILLIAMS, *Storia della tecnologia*, Torino, Boringhieri, 1966-1984, 7 voll.
L. WHITE JR., *Tecnica e società nel Medioevo*, Milano, Il Saggiatore, 1967.
A. WOLF, *A history of science, technology and philosophy in XVIth and XVIIth centuries*, London, 1950.
E. ZILSEL, *La genesi del concetto di progresso scientifico*, in PH. WIENER e A. NOLAND (a cura di), *Le radici del pensiero scientifico*, Milano, Feltrinelli, 1971.
V.P. ZUBOV, *Leonardo da Vinci*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1968.

IV. *Cose prima mai viste* (di PAOLO ROSSI)

1. *La riscoperta degli antichi e il senso del nuovo.*

All'interno della secolare tradizione dell'ermetismo e della *prisca theologia* il tema del «guardare al passato» costituisce un motivo centrale: la storia dell'uomo non è un'evoluzione da primitive origini animali alla civiltà; il passato si configura come un valore rispetto al presente e ogni progresso appare come un «ritorno». Da una mitica età dell'oro si passa a successive età di bronzo e di ferro. La ricerca della verità coincide con il tentativo di recuperare quel remoto oro che è sepolto nel tempo. I seguaci dell'ermetismo accettano le tesi sostenute da Lattanzio, da Clemente Alessandrino, da Eusebio nella loro polemica contro la filosofia dei pagani e vedono in una serie di testi dell'età ellenistica (gli *Hermetica*, gli *Inni orfici*, gli *Oracula sybillina*, i *Carmina aurea*) l'espressione «sacra» di una remotissima antichità, che ha caratteri indeterminati e che è di poco anteriore o di poco posteriore al diluvio universale.

Leonardo Bruni (1374-1444), Guarino Veronese (1374-1460), Giannozzo Manetti (1396-1459), Lorenzo Valla (1407-1457): anche gli esponenti della cultura umanistica guardano al passato. Leggere Cicerone, Ovidio, Virgilio, vuol dire fare ritorno a una civiltà che è superiore a quella nella quale ad essi è toccato in sorte di vivere e che costituisce l'irraggiungibile modello di ogni forma di convivenza umana. Ma a differenza dei maghi, dei seguaci dell'ermetismo, dei cultori della *prisca theologia*, gli umanisti fanno riferimento a un mondo storico preciso, che è collocabile nel tempo, del quale

è possibile studiare, con l'ausilio di una raffinata filologia, l'inconfondibile fisionomia, con il quale ci si può misurare in una sorta di gara o di contesa. Gli umanisti non furono passivi ripetitori e fu presente, nei loro scritti, una costante polemica non solo contro la «barbarie» degli Scolastici, ma anche contro i pericoli della ripetizione e del classicismo. La contrapposizione della *aemulatio* alla *imitatio* divenne il grido di battaglia di molti intellettuali europei da Angelo Poliziano (1454-1494) a Erasmo da Rotterdam (1469-1536). Nella cultura umanistica è in realtà presente un forte contrasto fra la «venerazione per gli antichi» (che conduce al classicismo) e una difesa della eguaglianza dei «moderni» che anticipa alcune delle tesi avanzate, nel corso del Seicento, nella disputa sugli antichi e sui moderni. Ma i testi riscoperti dagli Umanisti, nel corso del loro grandioso ed esaltante lavoro di ritrovamento, di raccolta, di commento, non si configuravano come semplici documenti. Quegli antichi testi contengono conoscenza: sono direttamente utili alla scienza e alla sua pratica. La diffusione di edizioni fatte direttamente sugli originali greci, di traduzioni non più fondate (come nel Medioevo) su traduzioni arabe di opere greche, ebbe effetti decisivi (che sono stati ampiamente studiati) sugli sviluppi del sapere scientifico. Fra le grandi edizioni basterà ricordare: quelle del testo greco di Euclide (Basilea, 1533) e la traduzione latina di Federico Commandino (1509-1575) (Pesaro, 1572); del testo greco di Archimede (Basilea, 1544) e la traduzione latina del Commandino (Venezia, 1558); delle traduzioni, sempre del Commandino, delle *Coniche* di Apollonio e dell'opera di Pappo (Bologna, 1566, Pesaro, 1588); l'edizione dell'*Almagesto* di Tolomeo (Basilea, 1538) e delle traduzioni della *Geografia* (un testo praticamente sconosciuto nel Medioevo). Alla prima traduzione dal greco in latino di scritti ippocratici (Roma, 1525) fecero seguito le edizioni greche del 1526 (Venezia) e del 1538 (Basilea). La enorme massa degli scritti di Galeno (per lo più tradotti dall'arabo nel Medioevo, con l'interpolazione di molti scritti apocrifi) fu accuratamente ordinata e integrata dalla riscoperta di trattati sconosciuti in Occidente. La prima raccolta latina di scritti galenici è del 1490 (Venezia); l'edizione dei testi greci del 1525 (Venezia) seguita da quelle curate da Joachim Camerarius e da Leonhart Fuchs (Basilea, 1538).

Nell'opera di molti umanisti la filologia si configura come uno strumento di indagine capace di liberare dagli errori, come il tentativo di liberare il rigoroso discorso dei grandi esponenti della scienza antica dalle «adulterazioni» della Scolastica. Il dialogo con Euclide, Ippocrate, Galeno, Tolomeo deve farsi diretto. I loro scritti (per usare un'espressione del Commandino) devono essere liberati «dalle tenebre e dalla squallidezza».

Fra la *riscoperta degli antichi* e il *senso del nuovo* che caratterizzano la cultura del cosiddetto Rinascimento (che è termine di significato ambiguo)

esiste un complicato rapporto. A intendere il quale gioverà non dimenticare che gli esponenti maggiori della scienza del Seicento assumono, nei confronti dell'antichità, un atteggiamento che è sostanzialmente diverso da quello degli esponenti della cultura umanistica. Nel momento stesso in cui fanno ricorso ai testi dell'antichità, Bacone e Cartesio negano il carattere esemplare della civiltà classica. Non respingono solo la pedante imitazione e la passiva ripetizione. Anche quel colloquio, quella gara, quella *aemulatio* sulla quale avevano insistito i migliori fra gli Umanisti, appare ad essi qualcosa che non ha più senso. Il terreno stesso di una «contesa» con gli antichi viene rifiutato con decisione: quando si impiega troppo tempo nel viaggiare, afferma Cartesio, si diventa alla fine stranieri nel proprio paese, allo stesso modo «chi è troppo curioso delle cose del passato diventa, per lo più, molto ignorante delle presenti». Lo spirito degli uomini che vissero nell'antica Grecia appare a Bacone «angusto e limitato». Se noi seguissimo la loro via, non riusciremmo certo ad imitarli: «Se dichiarassi di potervi offrire qualcosa di meglio degli antichi, dopo essere entrato nella loro stessa via, non potremmo evitare che si stabilisca un confronto o una sfida circa il merito e le capacità, ma ricordatevi che la questione concerne la via da seguire e non le forze, e che sosteniamo qui non la parte dei giudici, ma quella delle guide» (1897, I, 640-41).

La *imitatio* sembra non avere altra giustificazione che la pigrizia degli uomini, si fonda sul bisogno, che in essi è presente, di delegare ad altri le loro capacità razionali. Nel 1647 Blaise Pascal (1623-1662) ha ancora l'impressione che non si possano proporre impunemente idee nuove, perché il rispetto per l'antichità «è giunto a un punto tale che tutte le sue opinioni sono prese per oracoli e persino le oscurità ne sono considerate come misteri» (1959, 3). Ma anche la *aemulatio* non ha più senso. Avendo a disposizione soltanto gli occhi, gli antichi non potevano spiegare la Via Lattea diversamente da come fecero. Il fatto che conosciamo oggi la natura più di quanto essi la conoscevano, ci consente di «adottare nuovi pareri senza ingiuria e senza ingratitudine». Per questo, «senza contraddirli, possiamo affermare il contrario di ciò che essi dicevano» (*Ibid.*, 7-8, 9-11). Nelle pagine di Bacone, di Cartesio, di Galilei l'impresa scientifica si configura come un'avventura intellettuale che implica la capacità di guardare il mondo senza più bisogno di «guide»: «Ci è bisogno di scorta ne i paesi incogniti e selvaggi, ma ne i luoghi aperti e piani i ciechi solamente han bisogno di guida; e chi è tale, è bene che si resti in casa, ma chi ha gli occhi nella fronte e nella mente, di quelli si ha da servire per iscorta». Addurre tanti testimoni — scriverà ancora Galilei — «non serve a niente, perché noi non abbiamo mai negato che molti abbiano scritto o creduto tal cosa, ma sì bene abbiamo detto tal cosa essere falsa» (Galilei, VII, 138; VI, 366-367).

Anche la scoperta di nuove terre e l'allargamento dei confini del mondo avevano dato modo di «sperimentare» la limitatezza delle dottrine degli antichi. Si fa sempre più chiaro il concetto che la filosofia e la scienza degli antichi non sono raccolte di verità eterne, ma sono invece prodotti storici, legati a un tempo e a un luogo determinati, valide e soddisfacenti e pienamente legittime *allora*, ma non più valide, né soddisfacenti, né legittime *oggi*, in una situazione che pone differenti domande ed esige risposte differenti. Sarebbe vergognoso per gli uomini, troviamo scritto nel *Novum Organum* (1620) di Francesco Bacone, se «dopo aver svelato e illustrato l'aspetto del globo materiale, cioè delle terre, dei mari, degli astri, i confini del globo intellettuale restassero limitati entro i ristretti confini delle scoperte degli antichi» (I, 48). A dare il senso della limitatezza delle verità scoperte dagli antichi contribuirà non poco anche la nuova astronomia. Allargando oltremisura i confini dell'universo, giungendo addirittura, in alcuni casi, all'affermazione di un universo infinito, dette a molti la sensazione precisa della fine di tutte le tradizionali vedute e considerazioni del cosmo. Ci accorgiamo che non sappiamo nulla «che non sia o non possa essere dibattuto», scriveva Pierre Borel nel 1657 in un volume dedicato alle nuove scoperte astronomiche: l'astronomia, la fisica, la medicina «vacillano ogni giorno e vedono crollare i loro stessi fondamenti». Pietro Ramo ha distrutto la filosofia di Aristotele, Copernico l'astronomia di Tolomeo, Paracelso la medicina di Galeno: «siamo costretti ad ammettere che ciò che sappiamo è molto meno di quanto ignoriamo» (Borel 1657, 3-4).

L'esistenza di una grandiosa svolta del sapere, capace di suscitare negli animi esaltazione o entusiasmo o, come più spesso accade, stupore, smarrimento e senso di una irrimediabile crisi, viene confermata da innumerevoli documenti, così come viene confermata di continuo la necessità di un sapere che sappia far fronte alle molteplici novità presenti nel sapere e nella storia, che corrisponda alle nuove dimensioni dell'universo geografico ed astronomico, ad un'immagine nuova della natura. Non è evidente, scriverà John Dryden (1631-1700), che «nel corso di quest'ultimo secolo ci è stata rivelata una nuova natura?». Il suo contemporaneo Giuseppe Valletta (1636-1714), difensore della filosofia dei «moderni» e dell'eredità di Cartesio, aveva anch'egli (come molti intellettuali del tempo) la sensazione del legame profondo che doveva sussistere fra le nuove scoperte e la nuova filosofia: «essendosi scoverte nuove stelle, nuovi pianeti et fenomeni, piante, circolazione di sangue e tante altre cose, et quasi un mondo nuovo, par ch'egli era d'uopo di nuove filosofie per investigarle, non bastando le antiche» (1732, Pref.). Era un tema che aveva attraversato tutta la cultura europea. Lo ritroviamo, espresso con gli stessi accenti, in un testo della metà del Cinquecento: oggi sono conosciute molte cose che gli antichi avevano

ignorato: «nuovi mari, nuove terre, nuovi tipi d'uomini, di abitudini, leggi, costumi, nuove erbe, alberi, minerali, nuove invenzioni» (Le Roy 1567, 8-9). *Novum Organum* di Bacone, *Nova de universis philosophia* di Francesco Patrizi (1591), *De mundo nostro sublunari philosophia nova* di William Gilbert (1651), *Astronomia nova* di Keplero (1609), *Discorsi intorno a due nuove scienze* di Galilei (1638), *Novo teatro di machine* di Vittorio Zonca (1607): il termine *novus* ricorre, in modo quasi ossessivo, nel titolo di centinaia di libri scientifici pubblicati nel corso del Seicento (Thorndike 1971, 459-473).

2. *I libri.*

Siamo così abituati a quell'attività individuale, che avviene nel silenzio e nell'isolamento, della lettura dei libri, che ci è difficile renderci conto che l'oggetto familiare che abbiamo tra le mani sia potuto apparire come una novità sconvolgente, qualcosa che non solo diffondeva in modo prima non immaginabile le idee e il sapere, ma che sostituiva la lettura, prima prevalentemente collettiva ed effettuata probabilmente a voce alta, di testi privi di punteggiatura (McLuhan 1967). L'arte della stampa, la polvere da sparo, la bussola. Troviamo spesso accostate queste tre «invenzioni meccaniche». Esse danno l'impressione, vivissima nella *Città del Sole* di Campanella (1602), di una serie di conquiste che coincide con un accelerarsi della storia: «v'è più historia in cent'anni che non ebbe il mondo in quattromila; e più libri si fecero in questi cento che in cinquemila; e l'invenzioni stupende della calamita e stampe ed archibugi, gran segni dell'union del mondo» (1941, 109). Quelle tre invenzioni, scrive Bacone nel 1620, «hanno cambiato la faccia del mondo e le condizioni di vita sulla Terra». Da esse derivarono infiniti mutamenti «tanto che nessun impero, nessuna setta, nessuna stella sembra aver esercitato sulle cose umane un maggior influsso e una maggior efficacia» (Bacon 1975, 635-636).

Non c'era alcuna sopravvalutazione. Perché la fusione, in una tecnologia completamente nuova, di tecniche differenti (la manifattura della carta e dell'inchiostro, la metallurgia e la fusione dei caratteri mobili, le tecniche della stampa) introduceva in Europa, con tre secoli di anticipo, quella «teoria delle parti intercambiabili» che è alla base delle moderne tecniche della manifattura (Steinberg 1962). Hans o Johann Gutenberg (1400 ca.-1468) iniziò a stampare libri a Magonza (l'edizione della Bibbia è del 1456) con una tecnica che, pienamente sviluppata nel Cinquecento, resterà immutata fino all'Ottocento (e che viene tuttora utilizzata). Alcuni dati sono assai significativi. Nel 1480 lavoravano presse tipografiche in più di 110 città europee, delle quali 50 in Italia, 30 in Germania, 8 rispettivamente in Olanda e in Spagna, 5 in Belgio e in Svizzera, 4 in Inghilterra, 2 in Boemia e 1 in

Polonia. Solo vent'anni dopo, nel 1500, il numero delle città dove sono presenti tipografie è diventato 286. L. Febvre e H.J. Martin hanno calcolato che entro il 1500 siano state stampate 35.000 edizioni di 10-15.000 testi differenti e che almeno 20 milioni di copie fossero in circolazione. Nel corso del Seicento erano in circolazione 200 milioni di copie (Febvre e Martin 1958, 396-397).

Le edizioni di Aldo Manuzio (1447-1516), di piccolo formato, sono state non ingiustamente paragonate ai *paperback* del nostro tempo. Venezia divenne, accanto a Parigi e Lione, uno dei grandi centri dell'editoria. Alla fine del Cinquecento si tengono a Lione, Medina del Campo, Lipsia e Francoforte le prime fiere internazionali del libro. Un'edizione variava dalle 300 alle 3000 copie, ma la media delle copie per edizione era circa 1000.

La diffusione delle idee, l'avanzamento del sapere implicavano un forte impiego di capitali e una buona dose di rischio per gli imprenditori. Quando era stato elaborato nella cella del monaco e nello studio dell'umanista il sapere non aveva suscitato questo tipo di problemi.

3. *Un modo nuovo di guardare: la scienza e le illustrazioni.*

Come ha rilevato una volta Erwin Panofsky (che pubblicò nel 1945 una grande monografia su Albrecht Dürer) la rigorosa descrizione della realtà naturale che è presente nell'opera dei grandi pittori e incisori dal tardo Quattrocento al Seicento ha, per le scienze descrittive, la stessa importanza che ha (per l'astronomia e le scienze della vita) l'invenzione del telescopio e del microscopio. Le illustrazioni dei libri di botanica, anatomia, zoologia non sono semplici integrazioni al testo. La insufficienza delle descrizioni verbali dipendeva anche dalla assenza di un linguaggio tecnico (che viene raggiunto dalla botanica solo nel corso dell'Ottocento). La collaborazione degli «artisti» ebbe, nella scienze descrittive, effetti rivoluzionari.

Per questo, più che sui cosiddetti temi «filosofici» del pensiero di Leonardo da Vinci (1452-1519) nel quale vengono ripetuti motivi largamente diffusi, o sulla sua «fisica» dalla vaga e incostante terminologia, vale la pena di richiamarsi alle sue osservazioni sulla visione e sulla pittura, alla sua tendenza a «voler rendere visibile tutto» che è stata contrapposta all'atteggiamento di Leon Battista Alberti (1404-1472) che traduce in parole, valendosi della sua prosa latina di umanista raffinato, ogni concetto «strutturale» o «plastico» (Maltese 1954, 342). Molti dei suoi disegni di rocce, piante, animali, nuvole, moti di acque e di arie sono atti di conoscenza scientifica della realtà naturale. Nei suoi disegni anatomici è stato rilevato un progresso notevole fra il periodo precedente e quello successivo al 1506, che coincide con una lettura del *De usu partium* di Galeno e con l'inizio di una

più frequente pratica di dissezioni. L'anatomia comparata dei vertebrati, il volo degli uccelli, l'ottica fisiologica: sono tre temi ai quali Leonardo si appassionò per molti anni e sui quali esistono disegni innumerevoli. Centinaia di studi e di disegni sull'anatomia del cavallo sono legati ai progetti del monumento al Duca di Milano (iniziato nel 1483) e alla grande tavola della battaglia di Anghiari (iniziata nel 1503). Ma la curiosità di Leonardo oltrepassa di molto il livello al quale si arrestavano scultori e pittori interessati alla conoscenza dell'anatomia artistica o dei muscoli superficiali. Egli fu un osservatore metodico e sistematico e a questo suo atteggiamento è legata la sua tesi della superiorità dell'*occhio* sulla *mente*, dell'osservazione attenta del mondo reale sui libri e sulle scritture. Qui è il suo limite (tante volte e giustamente sottolineato da chi si è opposto all'immagine mitica di Leonardo «scienziato moderno») ed è anche la sua irripetibile grandezza: «Avete messo la pittura infra l'arti meccaniche; cierto, se i pittori fussino atti a laudare collo scrivere l'opera loro come voi, io dubito non giacerebbe in sì vil cognome; se voi la chiamate meccanica, perché è prima manuale ché le mani figurano quel che tenevano nella fantasia, voi scrittori disegniate colla penna manualmente quello che nello ingegnio vostro si truova».

I disegni di Leonardo restarono sconosciuti. Al 1461 risale il primo esemplare di xilografia impiegato per illustrare libri stampati con caratteri mobili. Il passaggio dalle xilografie alle incisioni (fra le più celebri quelle di Dürer) e alle acqueforti (Rembrandt è uno dei grandi artisti che si serve di questa tecnica) conduce a un progressivo raffinamento delle illustrazioni. Il primo testo illustrato di anatomia è il commento all'*Anatomia* di Mondino de' Luzzi (professore a Bologna fra il 1315 e il 1318) pubblicato a Bologna nel 1521 da Giacomo Berengario da Carpi (1460 ca.-1530) al quale fanno seguito, nel 1523, le *Isagoges breves in anatomiam*. Fra i moltissimi testi è soprattutto da ricordare il *De dissectione partium corporis humani* (1545) di Charles Estienne (Stephanus Riverius, 1504-1564). Ma le grandi bellissime tavole anatomiche, disegnate per il *De humani corporis fabrica* di Andrea Vesalio (1514-1564) superano per precisione e accuratezza ogni precedente esempio di raffigurazione anatomica e sono diventate, non ingiustamente, il simbolo di una svolta radicale nei metodi di osservazione della realtà. Sono attribuite dal Vasari a Jan Stephan van Calcar (1499 ca.-1550) e provengono comunque dalla Scuola del Tiziano. Basta confrontarle con gli approssimativi disegni anatomici dei manoscritti medievali per rendersi conto che nel modo di guardare e rappresentare il corpo umano si è verificato un salto qualitativo. È diventato un luogo comune sottolineare una coincidenza di date: il 1543 è l'anno in cui Copernico presenta la sua nuova immagine dell'universo e Vesalio offre agli uomini un ritratto nuovo del loro corpo. Vesalio, che era nato a Bruxelles da una famiglia di medici, aveva studiato a Lovanio e a

Parigi, viaggiato in Italia e soggiornato a Venezia, nel 1537 era stato chiamato a insegnare anatomia a Padova e aveva successivamente tenuto lezioni a Bologna. Nel 1538 aveva pubblicato le sei tavole anatomiche, note come *Tabulae sex*. Nel 1543 era andato di persona a Basilea a sorvegliare la stampa della *Fabrica* e dell'*Epitome* (pubblicata anch'essa quell'anno). Quando vide la luce il suo capolavoro aveva solo ventotto anni: «non mi nascondo — scrive nella *Prefazione* — che il mio tentativo, a causa della mia età, sarà poco autorevole e non rimarrà senza critiche per la frequente denuncia di assiomi galenici non rispondenti al vero... a meno che l'opera non esca protetta dal patrocinio di un qualche nume». Il nume protettore era l'imperatore Carlo V, al quale il libro era dedicato e che nominerà Vesalio medico imperiale.

Vesalio segue Galeno nel piano delle sezioni che compongono l'opera, nella interpretazione della nutrizione, nell'affermazione della maggiore importanza del sistema venoso rispetto all'arterioso. Pensa anche, con Galeno, che le vene traggano origine dal fegato. Ma, anche nella *Prefazione*, prende energicamente le distanze dalla tradizione affermando che Galeno «non si accorse di nessuna delle molteplici e sostanziali differenze fra il corpo delle scimmie e quello dell'uomo, ad eccezione del diverso modo di flettersi delle dita e dei garretti»; che egli, nel corso di una sola dimostrazione anatomica «errò più di duecento volte nella descrizione corretta delle parti, dell'armonia, dell'uso e della funzione del corpo umano». I medici, così come in altri campi i seguaci di Aristotele, ne sono grandemente turbati, «controllano con occhio severo e con grande desiderio di difenderlo le parti più minute sezionate». Tuttavia sono anche guidati dall'amore per la verità, accade spesso che «a poco a poco si ammansiscano» e finiscano per attribuire «ai loro propri occhi e ai loro criteri non inefficaci più fede che agli scritti di Galeno». Le tavole che illustrano il testo non servono ad allontanare dalla realtà, ma ad avvicinarla, non sostituiscono la pratica della dissezione, ma esortano ad essa.

I molti interpreti contemporanei che hanno insistito sul «galenismo» di Vesalio non solo hanno avuto la tendenza a trascurare queste affermazioni, ma anche a non dar conto delle veemenza degli attacchi ai quali fu sottoposta la *Fabrica* da parte dei difensori dell'ortodossia galenica. Jacques Dubois (Jacobus Sylvius, 1478-1555), antico maestro di Vesalio a Parigi, diventerà il suo principale avversario e nemico, lo chiamerà di continuo (con un pesante gioco di parole) *Vesanus* (folle o delirante) accusandolo di aver avvelenato con la sua opera il mondo della medicina. Nel momento in cui affermava con energia la necessità di una piena saldatura fra la medicina clinica e la dissezione (e la chirurgia), polemizzava con forza contro una medicina ridotta a cultura libresca, lottava per la convergenza, nella medicina, della teoria e dell'osservazione diretta, Vesalio proponeva in realtà una nuova

immagine del medico, del professore di medicina e del rapporto che intercorre, nelle scienze «sperimentali», fra il lavoro delle mani e l'opera dell'intelletto. Il «disprezzo per l'opera della mano» gli appare una delle ragioni della degenerazione della medicina. I medici si sono limitati alla prescrizione dei farmaci e delle diete e hanno abbandonato il resto della medicina a coloro che «essi chiamano chirurghi e considerano appena come schiavi». Quando tutto il procedimento dell'operazione manuale fu affidato ai barbieri «non solo andò perduta per i medici la conoscenza dei visceri, ma venne completamente meno l'abilità settoria». I medici non si arrischiavano ad operare, mentre quelli cui quest'incarico era affidato erano troppo ignoranti per leggere gli scritti dei dottori. Si è in tal modo fatta strada una consuetudine detestabile: uno esegue il sezionamento, un altro descrive le parti. Quest'ultimo «gracchia dall'alto di una cattedra con rara presunzione» e ripete fino alla monotonia cose che non ha osservato direttamente, ma ha imparato a memoria dai libri: ogni cosa viene insegnata male e «in quella confusione sono presentate agli studenti meno cose di quelle che un macellaio dal suo bancone potrebbe insegnare a un medico» (Vesalio 1964, 19, 25, 27). Nel 1555 venne pubblicata, con alcune piccole correzioni, la seconda edizione della *Fabrica*. Nominato medico di Filippo II di Spagna, Vesalio rinunciò alla sua carica nel 1562. Morì due anni più tardi, di fame e di sete, dopo un naufragio che avvenne durante il ritorno da un pellegrinaggio a Gerusalemme. Era diretto a Padova, ove era stato nuovamente chiamato ad insegnare dal Senato Veneto.

Nove anni dopo la pubblicazione del *De Fabrica*, Bartolomeo Eustachio (1510?-1574) nato a Sanseverino nelle Marche e medico a Roma e autore di *Opuscola anatomica* (1563) fece preparare una serie di bellissime incisioni in rame di anatomia umana. Furono però pubblicate (e poi più volte ristampate) solo nel 1714 a cura dell'anatomista Gian Maria Lancisi (1654-1720).

Il grande libro di Vesalio, così come le incisioni di Eustachio, erano anche la manifestazione della collaborazione, che andrà facendosi sempre più stretta, tra l'opera degli scienziati naturali e quella degli artisti disegnatori e incisori. Le tecniche illustrative ed anche le forme di questa non sempre facile collaborazione, relativamente all'ingegneria, zoologia, anatomia, botanica (su quest'ultima cfr. per esempio Blunt 1955) sono state analiticamente studiate ed è stato molte volte sottolineato lo straordinario e rapido passaggio (che si verifica nel corso del Cinquecento) dalle illustrazioni che hanno per oggetto il testo e sono interamente costruite su di esso a quelle che hanno per oggetto la natura. I due grandi libri tedeschi che segnano l'inizio degli erbari moderni sono: le *Herbarum vivae icones* (1530-1536) di Otto Brunfels (1488-1534) illustrate da Hans Weiditz; il *De historia stirpium* (1542) di Leonhart Fuchs (1501-1566). In entrambi i casi la novità è da vedere più

nelle illustrazioni che nei testi che si muovono su un piano abbastanza tradizionale. E ciò, entro certi limiti, vale anche per l'opera di Vesalio. Si è impiegata la massima cura, scrive Fuchs nella prefazione, «affinché ogni pianta venisse rappresentata con le sue radici, steli, foglie, fiori, semi, frutti; si è pertanto deliberatamente evitato di modificare la forma naturale delle piante mediante ombre o altre cose non necessarie con le quali gli artisti cercano talvolta di raggiungere la fama». Almeno in questo caso, fu esercitata una qualche forma di sorveglianza: «non abbiamo permesso agli artisti di indulgere ai loro capricci, in modo tale da impedire che le riproduzioni non corrispondano esattamente alla realtà» (*Praefatio*). In cambio di queste mancate concessioni, Fuchs fu largo di pubblici riconoscimenti: accanto a quello dell'autore, sono presenti nell'opera i ritratti degli incisori (uno dei quali è Albrecht Meyer) e dello stampatore. Di tanta accuratezza si serviranno abbondantemente, sino alla fine del Settecento ed oltre, non pochi autori di libri di botanica.

I due primi giardini botanici universitari furono istituiti a Padova e a Pisa intorno al 1544. Accanto all'aula di anatomia, gli «orti» diventano, nei primi decenni del Seicento, elementi necessari alla rispettabilità di una Università. All'origine dell'insegnamento e della ricerca nella botanica italiana sta la figura di Luca Ghini (1490-1556). Ma gli erbari del Cinquecento furono numerosi in ogni nazione. Fra gli autori principali: in Germania, Joachim Kammermeister o Camerarius (1534-1594); nei Paesi Bassi, Cristophe Plantin (1514-1588), Rembert Dodoens o Dodonaeus (1516-1585), Charles de l'Ecluse o Clusius (1526-1609); in Svizzera, Gaspard e Jean Bauhin (1560-1624, 1541-1613); in Francia Jean Ruel (1479-1537); in Inghilterra William Turner (1510-1568); in Italia, Pietro Andrea Mattioli (1501-1577), Prospero Alpino (1553-1617).

Assai meno numerose sono le opere enciclopediche di argomento zoologico. Fra le storie «speciali» di animali sono soprattutto da ricordare (anche per le illustrazioni) *La nature et diversité des poissons* (1555) e *L'histoire de la nature des oyseaux* (1555) di Pierre Belon (1517-1564); il *De piscibus marinis* (1554) di Guillaume Rondelet (1507-1566) e lo splendido trattato *Dell'anatomia et dell'infinità del cavallo* del senatore bolognese Carlo Ruini (1530-1598). Sul terreno delle opere generali il maggior monumento della cultura del Cinquecento (accanto all'opera di Ulisse Aldrovandi) è la *Historia animalium* dello zurighese Konrad Gesner (1516-1565) che ebbe breve vita, ma fu medico e umanista e si occupò (e pubblicò libri) di botanica, di linguistica, di Alpi e di alpinismo. A ventinove anni, nel 1545, aveva pubblicato una *Bibliotheca universalis* che era una bibliografia dei libri pubblicati a stampa in latino, greco, ebraico. I cinque volumi in folio dell'opera maggiore ai quali vanno aggiunti i tre volumi di *Icones* furono

pubblicati fra il 1551 e il 1558 (il quinto uscì postumo nel 1587). Comprendono circa 4.500 pagine e più di mille incisioni in legno, opera di artisti di Zurigo. La celebre immagine del rinoceronte è ricavata da Albrecht Dürer ed è costruita su materiale di seconda mano. In quell'illustrazione (che servirà di modello a tutte le illustrazioni del rinoceronte fino a tutto il Settecento) opera la suggestione di ciò che Dürer sapeva del più celebre fra gli animali «esotici»: il drago coperto da squame (Gombrich 1972, 98). Al corno sul naso, Dürer aveva aggiunto un piccolo corno spiraliforme, molto dietro le orecchie, nella regione delle vertebre cervicali (che scomparirà dalle illustrazioni solo nel 1698).

Gesner ignora l'anatomia comparata. La classificazione degli animali è alfabetica (l'*Hippopotamos* è collocato fra l'*Hippocampus* e la *Hirudo* o sanguisuga). Ogni animale è descritto in capitoli spesso molto ampi (al cavallo sono dedicate 176 pagine in folio, all'elefante 33) suddivisi in sezioni (designate da una lettera). Nelle varie sezioni si tratta rispettivamente del nome dell'animale, nelle varie lingue antiche e moderne, del suo habitat e morfologia, delle malattie, dei comportamenti, dell'utilità e allevamento, della commestibilità (ove possibile), dell'utilità per la medicina, dell'etimologia e dei proverbi.

Nella sua tesi sulle «illustrazioni» e sui «limiti della somiglianza al vero», Ernst Gombrich ha certamente ragione: una rappresentazione già esistente «eserciterà sempre il suo ascendente sull'artista anche quando questi vuole fissare il vero» e «non si può creare dal nulla un'immagine visiva». E tuttavia, com'egli stesso ha sottolineato e come risulta da un confronto fra le immagini di un leone e di un porcospino tracciate dall'architetto gotico Villard de Honnecourt e quella di un coniglio dipinto ad acquarello da Dürer, nel periodo di tempo compreso fra il Trecento e il Cinquecento è accaduto qualcosa di decisivo. Lo «stile» ha perso la sua rigidità, ha «imparato ad adeguarsi con sufficiente scioltezza» ai soggetti che cadono sotto lo sguardo (cfr. Gombrich 1965, 102-103). Questo mutamento ha avuto, anche sugli sviluppi del sapere scientifico, effetti non secondari.

4. *La «certezza che è data dagli occhi»: nuove stelle.*

Nel 1609 Galileo Galilei (1564-1642) puntava verso il cielo il cannocchiale e iniziava una serie di osservazioni che verranno rese pubbliche in un piccolo libro, il *Sidereus Nuncius*, che vide la luce a Venezia, il 12 di marzo dell'anno seguente. Il cannocchiale era nato negli ambienti dell'artigianato olandese. Galileo l'aveva ricostruito e l'aveva presentato a Venezia nell'agosto del 1609 per farne poi «libero dono» al governo della Signoria. Nonostante che Galilei affermasse poi di aver ritrovato il cannocchiale «per

via di discorso», è stato ormai a sufficienza dimostrato che egli disponeva, in quel giro d'anni, di una scarsa preparazione ottica. Ciò che invece va sottolineato, perché segna una rivoluzione nell'atteggiamento dello scienziato, è la *fiducia* galileiana in uno strumento nato nell'ambiente dei meccanici, progredito solo per pratica, parzialmente accolto negli ambienti militari, ma ignorato, quando non disprezzato, dalla scienza ufficiale. Il cannocchiale non è per Galileo uno dei tanti strumenti curiosi costruiti per il diletto degli uomini di corte o per l'immediata utilità degli uomini d'arme. Egli lo impiega e lo volge verso il cielo con spirito metodico e con mentalità scientifica, lo «sperimenta centomila volte e in centomila altri oggetti», fa «centinaia di migliaia di esperienze in mille e mille oggetti, et vicini e lontani, e grandi e piccoli, e lucidi e oscuri».

In una lettera del gennaio 1610, indirizzata a Belisario Vinta, ministro del Granduca di Toscana, troviamo, esplicitamente presente, la consapevolezza del carattere rivoluzionario delle scoperte realizzate mediante il cannocchiale: «Io mi trovo al presente in Venezia per far stampare alcune osservazioni le quali col mezo di un mio occhiale ho fatte ne i corpi celesti; e sì come sono d'infinito stupore, così infinitamente rendo grazie a Dio, che si sia compiaciuto di far me solo primo osservatore di cose ammirande e tenute a tutti i secoli occulte». Quelle osservazioni davano in realtà un colpo mortale alla distinzione qualitativa fra corpi celesti e corpi terrestri che era uno dei pilastri fondamentali del sistema aristotelico-tolemaico. Galileo *vede* che la superficie della Luna «non è affatto liscia uniforme e di sfericità esattissima, come di essa e degli altri corpi celesti una numerosa schiera di filosofi ha ritenuto, ma al contrario disuguale, scabra, ripiena di cavità e di sporgenze, non altrimenti che la faccia stessa della Terra la quale si differenzia qua per catene di monti, là per profondità di valli».

I confini fra le tenebre e la luce si rivelano ineguali e sinuosi, nella parte tenebrosa della Luna appaiono punte lucenti che, trascorso un certo tempo, si congiungono con la parte luminosa. Sulla Terra non accade lo stesso? le cime più alte dei monti non sono illuminate dalla luce dell'aurora, mentre l'ombra occupa le pianure? e, sorto il Sole, le illuminazioni delle pianure e dei monti non finiscono per congiungersi? Il paesaggio lunare è dunque *un paesaggio terrestre*. La Terra ha caratteristiche che *non sono uniche* nell'universo. I corpi celesti, almeno nel caso della Luna, non hanno una differente natura, non posseggono cioè quei caratteri di assoluta perfezione che una millenaria tradizione ha loro attribuito. E le stelle sono enormemente più numerose di quelle che appaiono alla «vista naturale». Il cannocchiale mostra un cielo popolato di astri innumerevoli, rivela la complicata struttura delle costellazioni già note, mostra la natura della Via Lattea: «quello che fu da noi in terzo luogo osservato è l'essenza, ossia la materia della Via Lattea

che, in virtù del cannocchiale, è dato scrutare tanto sensibilmente da esserne risolte, con la certezza che è data dagli occhi, tutte le dispute che per tanti secoli tormentarono i filosofi, e noi liberati da verbose discussioni». L'osservazione della parte non luminosa della superficie lunare porta Galileo a concludere che lo splendore della Luna è dovuto alla riflessione della luce proveniente dalla Terra, che è a sua volta illuminata dal Sole. Fra le stelle fisse e i pianeti si rivela infine una sostanziale differenza. Le prime, osservate con il cannocchiale, conservano il loro aspetto di punti luminosi circondati da «raggi brillanti», non sembrano aumentare di grandezza, come invece accade per i pianeti che appaiono come globi rotondi e perfettamente delineati, simili a piccole lune. La distanza delle stelle fisse dalla Terra è dunque incomparabilmente più grande di quella che separa i pianeti dal globo terrestre.

In alcune pagine del *Sidereus Nuncius*, che danno ancor oggi al lettore il senso di trepidazione che sempre accompagna la visione di una realtà nuova, Galileo espone un'altra delle sue fondamentali scoperte. Nella notte del 7 gennaio egli ha osservato, accanto a Giove, tre piccole lucentissime stelle, due a oriente, una ad occidente del pianeta; la notte seguente esse si presentano in posizione diversa, sono tutte a occidente; il 10 due delle stelle sono a oriente, la terza è come nascosta dal pianeta; il 12 dopo due ore di osservazione Galileo assiste alla comparsa della terza stella, il 13 compaiono quattro stelle: sono le lune o i satelliti di Giove (oggi sono denominati Io, Europa, Ganimede, Callisto) che, in onore di Cosimo II de' Medici, Galileo denominò «stelle medicee».

Il carattere rivoluzionario delle scoperte galileiane non sfuggì alla coscienza dei contemporanei. In un poema dedicato al «principe dei matematici del nostro secolo», Johannes Faber affermava che Vespucci e Colombo, navigatori in mari prima sconosciuti, dovevano cedere il passo a Galileo che ha donato al genere umano nuove costellazioni. Il paragone con le grandi scoperte geografiche, con i viaggi nel Nuovo Mondo ritorna più volte. William Lower, in Inghilterra, scrive al suo amico Thomas Hariot che Galileo ha realizzato, con le sue scoperte, qualcosa di più importante di Magellano che pure ha aperto agli uomini vie prima inesplorate. Nel 1612, in un'opera dedicata alla descrizione del mondo intellettuale del suo tempo, Francesco Bacone si congratula «con l'industria dei meccanici, con lo zelo e l'energia di certi uomini dotti che, poco tempo addietro, con l'aiuto di nuovi strumenti ottici, come usando scialuppe e piccole barche, hanno cominciato a tentare nuovi commerci con i fenomeni del cielo». La loro impresa, continuava, va considerata «qualcosa di nobile e di degno della razza umana e quegli uomini, oltre che per il loro coraggio, sono da apprezzare per la loro onestà, perché, con candore e con chiarezza, hanno dato via via conto del

modo in cui ad essi risultava ogni singolo punto della loro ricerca». L'entusiasmo per la novità dell'impresa, per l'apertura di vie non prima tentate, si congiungeva qui all'apprezzamento positivo del metodo galileiano, così rigorosamente sperimentale, così lontano da ogni costruzione superstiziosa e fantastica di mondi immaginari. Il Lord Cancelliere, anche se non accettò la cosmologia di Copernico, era un grande filosofo. Tale non era certo Sir Henri Wotton, che pure era uomo di vasta erudizione e di fine cultura, ambasciatore inglese a Venezia. Il giorno stesso della pubblicazione del *Sidereus Nuncius* spedisce il libro al suo Re, con la promessa di inviargli presto un cannocchiale e con parole che danno il senso preciso dello sconvolgimento che l'opera di Galileo ha portato nei tradizionali quadri dell'universo: «Invio alla Maestà Vostra, con questa lettera, la più strana notizia che mai sia apparsa al mondo. Si tratta del libro qui allegato del professore di matematica di Padova... Costui ha rovesciato tutta l'astronomia e tutta l'astrologia... L'autore potrà o diventare oltremodo famoso, o rendersi oltremodo ridicolo».

Non mancarono infatti le polemiche aspre, i rifiuti tenaci, le ostinate manifestazioni d'incredulità. Esse provenivano soprattutto dagli ambienti della cultura accademica legata alle posizioni dell'aristotelismo. Il celebre Cremonini, amico e collega di Galileo a Padova, non crede che Galileo abbia visto qualcosa e protesta contro quegli «occhiali» che «imbalordiscono la testa» e rimprovera Galileo di essere entrato «in tutte queste girandole». A Bologna, l'astronomo Giovanni Antonio Magini assume un atteggiamento di ostilità e di malevolenza. Quando Galileo si reca a Bologna nell'aprile del 1610 per cercare di persuadere gli studiosi della verità delle sue scoperte, Martino Horki, che diventerà in seguito un avversario irruento, scrive al grande Keplero: «ho provato in mille modi questo strumento di Galilei, sia nelle cose inferiori che nelle superiori; nelle prime fa meraviglie, ma fallisce nel cielo perché le stelle fisse appaiono duplicate».

Più tardi giungeranno il riconoscimento autorevole e limpido di Keplero, e, dopo le prime iniziali diffidenze, l'adesione dei Gesuiti romani. Galilei aveva vinto, perché a convincere gli ultimi, irriducibili ostinati, a ridurre al silenzio quei professori che negavano le montagne sulla Luna o l'esistenza dei satelliti di Giove per ragioni logico-metafisiche, non sarebbe bastato com'egli scrisse più tardi, «il testimonio delle medesime stelle che scese in Terra parlassero di se stesse». La realtà dell'universo era stata ampliata dall'uso di uno strumento meccanico che era in grado di aiutare e perfezionare e raffinare i sensi dell'uomo. Le osservazioni astronomiche di Galileo non segnavano soltanto la fine di una visione del mondo. Sembrarono anche ai contemporanei l'atto di nascita di un nuovo concetto di esperienza e di verità. La «certezza data dagli occhi» aveva spezzato il cerchio senza fine delle dispute.

5. *Una grande varietà di creature in ogni piccola particella.*

Nelle «macchine più piccole della natura» — scriveva il medico, filosofo e saggista Thomas Browne (1605-1682) — «c'è più curiosa matematica» che nei prodotti più maestosi della natura, come balene, elefanti, dromedari e cammelli (*Religio medici*, 1646, I, 20). Il fascino esercitato dal piccolo e dall'infinitamente piccolo non fu certo minore, nel Seicento e nel Settecento, di quello esercitato dal grande, dalle sterminate distanze, dall'infinità dell'universo. La concezione della natura come un *plenum formarum*, come infinita gerarchia di forme, come una Scala dell'Essere piena e infinitamente graduata (che è una delle grandi idee-forza della cultura filosofica di questi due secoli), sembrava di per se stessa implicare l'esistenza di realtà minute e invisibili, di necessità sfuggenti alle limitate capacità dell'occhio umano. Se quei grandi principi metafisici erano validi, allora «il mondo dei microorganismi non era nulla più di ciò che ci si poteva aspettare» (Lovejoy 1966, 256). A Henry Power, che pubblica nel 1664 una *Experimental philosophy, containing new experiments microscopical, mercurical, magnetical* le «nuove scoperte della diottrica» suonano conferma della tesi che i corpi più piccoli che siamo in grado di vedere ad occhio nudo sono solo «i medi proporzionali» fra due estremi che sfuggono ai sensi. Anche l'idea che la natura sia spiegabile mediante un esame della sua struttura corpuscolare o particellare implica l'interesse per strumenti capaci di ampliare l'ambito di possibilità che la natura ha concesso ai sensi. Gli abitanti della Nuova Atlantide di Francesco Bacone (1627) possiedono aiuti per la vista migliori delle lenti e degli occhiali «per vedere distintamente e perfettamente i corpi più minuti, come le forme e i colori di piccoli insetti e vermi, la grana e la venatura delle gemme e le composizioni dell'orina e del sangue, altrimenti invisibili» (*Scritti*, 1975, 861).

In questo caso, ponendo soprattutto mente all'ultima affermazione, l'araldo della nuova scienza non è certo in ritardo sui tempi perché le prime osservazioni al microscopio risalgono, come vedremo, agli anni 1625-1665. Non c'è, nella storia del microscopio e dei suoi rapporti con la scienza, nessuna data drammatica, paragonabile a quella del 1609 per il cannocchiale. Quest'ultimo, come è stato più volte notato, esercita la sua azione all'interno di una scienza già consolidata, che ha un'antica e salda tradizione. Il microscopio sta invece, in qualche modo, agli inizi di un lungo processo che conduce al costituirsi di nuove scienze. Istologia e microbiologia si affermeranno solo nel Settecento. Il nome *microscopium* è usato in una lettera scritta da Johannes Faber (il 13 aprile 1625) al principe Federico Cesi che, appena diciottenne, aveva stretto con tre giovani amici, nel 1603, quel patto scientifico che è all'origine dell'Accademia dei Lincei. Il primo volume

«separato» di microscopia è la *Centuria observationum microscopicarum* (1655) di Pierre Borel (1620-1671).

Nei primi decenni del Seicento erano usati «occhialini» tubolari con la lente a un estremo e l'oggetto posto, dall'altro lato, su una lastra di vetro. L'ingrandimento era di circa dieci diametri. Con strumenti di questo tipo lavorano i primi membri dell'Accademia dei Lincei (e il nome dell'Accademia fa riferimento alla nota acutezza di vista della lince): Federico Cesi (1585-1628), Francesco Stelluti (1579-1651), Fabio Colonna (1567-1650), Johannes Faber di Bamberg (1570-1650). Nel 1625, Federico Cesi aveva aggiunto al suo *Apiarum* una *Tavola dell'ape*, pubblicata nel *Persio tradotto* (Roma, 1630) di Stelluti (uno dei tre amici del patto). Con ogni probabilità è questa la prima illustrazione a stampa di oggetti visti con l'aiuto di un microscopio. Ciò che si vede in quella tavola, insiste con forza lo Stelluti, «era sconosciuto ad Aristotele e ad ogni altro naturalista». All'ape «in atto di camminare» si affiancavano nella tavola (contrassegnati da lettere) le «penne dell'ape», «l'occhio tutto peloso», la «lingua con le sue quattro linguette», le zampe viste dal lato interno e da quello esterno e così via. Nel 1644, a Palermo, Odierna studia l'occhio composto di varie specie di insetti. Due anni dopo, a Napoli, Fontana compie una serie di osservazioni sull'anguillula dell'aceto.

Alla generazione successiva appartengono i cosiddetti microscopisti classici: Robert Hooke (1635-1703), Antony van Leeuwenhoeck (1632-1723), Jan Swammerdam (1637-1680), Marcello Malpighi (1628-1694), Nehemiah Grew (1641-1712). Essi lavorano con strumenti capaci di ingrandire (sia pure con una mediocre risoluzione) fino a 100 diametri. Nel microscopio composto (del quale non fece uso Leeuwenhoeck) le lenti erano poste all'estremità di tubi di cartone, il tubo dell'oculare era incastrato in quello dell'obiettivo e l'apparecchio veniva messo a fuoco facendo scorrere i tubi. I microscopi di questo tipo (costruiti in Italia da Campani) ebbero larga diffusione. Quello descritto da Hooke ha un dispositivo a vite per la messa a punto ed è costituito da un grosso corpo cilindrico: l'obiettivo è formato da una lente biconvessa regolata da un diaframma, mentre l'oculare è costituito da una lente piano-convessa e da una piccola lente biconvessa (lo specchio riflettente verrà introdotto solo intorno al 1720). Questi microscopi (così come le stupefacenti, piccolissime lenti di Leeuwenhoeck) non si limitavano ad avvicinare e a ingrandire un mondo familiare (come nel caso delle api ingrandite dal Cesi). Si apriva allo sguardo un mondo nuovo e inaspettato di minerali e di tessuti organici strutturati secondo forme, un mondo popolato da invisibili esseri viventi.

Dobbiamo tornare per un momento al tema del significato e dell'importanza delle illustrazioni. Perché proprio le bellissime incisioni del grande

architetto Christopher Wren (1632-1723) che compaiono nella *Micrographia* di Hooke (1665), collocano quest'opera (esattamente com'era accaduto un secolo prima con quella di Vesalio) su un piano diverso da quelle dei suoi contemporanei. E fra i contemporanei c'era Marcello Malpighi, che è certamente assai più «biologo» di Hooke, e che nel 1661 aveva pubblicato il *De pulmonibus*. Le grandi possibilità offerte alla scienza dalle illustrazioni erano chiare da quasi un secolo e mezzo, ma la prima generazione dei microscopisti era rimasta quasi insensibile a questo tema. Le 32 splendide tavole della *Micrographia* (ancora utilizzate in manuali dell'Ottocento) rivelarono cosa poteva essere fatto su questo terreno (Hall 1976, 13).

Punte di aghi, pulci, mosche, formiche, pidocchi: più che oggetti non osservati da altri, Hooke descrisse con una precisione e un amore per il dettaglio non consueti ai suoi tempi ciò che vide attraverso il microscopio. L'involucro esterno dell'occhio della mosca è flessibile e trasparente e assomiglia alla sostanza della cornea di un occhio umano. Tolto via il bulbo e la sostanza scura e mucosa che vi è sotto «ho potuto vedere tale involucro trasparente come un sottile frammento di pelle, avente molte cavità all'interno, disposte nel medesimo ordine delle protuberanze esterne». Non c'è da dubitare che questo curioso apparato sia l'organo della vista per le mosche e i crostacei. Quest'organo «è fornito di cornea con un umore trasparente e con un'uvea o retina e la forma di ciascuno dei piccoli emisferi è perfettamente curva e liscia e assai brillante di luce viva e chiara quando l'animale è vivo, flaccida e raggrinzita quando l'animale è morto» (1665, *Preface*). Nel corso della diciottesima osservazione che è intitolata «Lo schematismo (che è termine baconiano) o tessuto del sughero e sulle cellule (*cells*) o pori di altri corpi porosi» viene impiegata per la prima volta, in analogia con le celle del favo delle api, il termine *cellula*. Ma non ha alcun senso, su questa base, attribuire ad Hooke la scoperta della cellula.

Hooke, che è uno scienziato baconiano, insiste a lungo sul tema dell'ampliamento del dominio dei sensi. Il cannocchiale ha aperto i cieli allo sguardo, ha rivelato «un vasto numero di stelle nuove e nuovi movimenti che erano completamente sconosciuti agli astronomi antichi». Allo stesso tempo, anche la Terra, un tempo familiare, ci sembra ora cosa nuova ed osserviamo in ogni sua particella di materia «una varietà di creature così grande come quelle che prima avremmo potuto contare nell'intero universo». I nuovi strumenti consentono sia di esaminare il mondo visibile, sia di scoprire mondi sconosciuti: ogni considerevole perfezionamento del telescopio e del microscopio «produce nuovi mondi e terre incognite per la nostra vista» (Hooke 1665, 177-178).

Nel corso di alcune sedute della Royal Society, nell'anno 1677, Hooke dette lettura di una lettera di diciassette pagine che era stata inviata a

quell'illustre accademia da Antony van Leeuwenhoeck. Il suo autore non era un filosofo naturale e non apparteneva al mondo dei dotti. Impiegato in qualità di usciere presso il tribunale di Delft (una cittadina dell'Olanda meridionale) si era costruito da solo varie centinaia di piccolissime lenti biconvesse a breve lunghezza focale e piccole sfere di vetro fuso (di diametro inferiore a mm 2,5) che, inserite in una montatura metallica, funzionavano come microscopi semplici. Assistito dalla sua stupefacente abilità di ottico (una delle sue lenti si è rivelata in questo secolo superiore a qualsiasi altra lente semplice nota) e da una insaziabile curiosità, Leeuwenhoeck compì osservazioni sugli spermatozoi e sui globuli rossi del sangue, individuò protozoi e batteri. Il moto degli animaletti presenti in una goccia d'acqua gli appaiono, nel settembre 1674, «veloci e meravigliosi a vedersi e penso che alcune di queste piccole creature siano circa mille volte più piccole che io abbia mai visto in una crosta di formaggio o in una muffa». Anche all'interno del corpo umano vivono piccoli animali. Nell'ottobre 1676 vengono descritti i protozoi: «è proprio come vedere, a occhio nudo, piccole anguille che si contorcono l'una contro l'altra e l'intera acqua sembra viva di questi vari animaletti; e questa è per me, di tutte le meraviglie che ho osservato in natura, la più meravigliosa di tutte».

6. *Piante, animali e uomini di un Mondo Nuovo.*

«En las Indias todo es portentoso, todo es sorprendente, todo es distinto y en escala mayor que lo que existe en el Viejo Mundo». Anche Cristoforo Colombo (1451-1506) e Ferdinando Magellano (1480-1521) e gli altri innumerevoli viaggiatori e navigatori degli inizi dell'età moderna, avevano visto con i loro occhi — come più tardi Galilei e Hooke e Leeuwenhoeck — cose prima mai viste. Anche la visione di nuove terre aveva contribuito a mettere in crisi l'idea della superiorità degli antichi. «Con l'isperientia e la verità, ritruovate da semplici e diligentissimi nocchieri» si vede il contrario di quanto filosofi greci e Padri della Chiesa hanno affermato circa l'abitabilità delle zone torride, l'esistenza degli Antipodi, la navigazione negli Oceani, la intransitabilità delle colonne d'Ercole.

Nel Nuovo Mondo si trovano piante sconosciute (mais, manioca, patata, fagiolo, pomodoro, peperone, zucca, avocado, ananas, cacao, tabacco, albero della gomma) e animali mai visti (tacchino, lama, lince, puma, condor, giaguaro, tapiro, vigogna, caimano). Descrizioni di nuovi animali e nuove piante sono presenti nella *Historia general y natural de las Indias* (1526) di Gonzalo Fernandez de Oviedo y Valdès (1478-1557) che fu per più di quarant'anni ispettore per l'oro a Santo Domingo. In carte e in mappe del primo Cinquecento il nuovo continente è popolato di unicorni, cinocefali e

uomini con la testa collocata sul petto; Oviedo rinuncia alla descrizione di esseri mostruosi e di entità immaginarie. Pensa che esiste un'unica natura che assume differenti forme nelle diverse parti della Terra: piante nocive in una parte del mondo sono salutari nell'altra, gli uomini possono essere bianchi o nerissimi e le tigri, da noi agili e svelte «sono torpide e pesanti nell'India di Vostra Maestà». Anche il gesuita José Acosta (1539-1600), nella *Historia natural y moral de las Indias* (1590) descrive le caratteristiche del suolo, i minerali, i vulcani, i metalli, le piante, gli animali, i pesci e gli uccelli. Il Nuovo Mondo è popolato di «animali di numero e aspetto mai conosciuto, dei quali non hanno memoria né greci, né latini, né alcun altro popolo del *mundo de acá*». Sugli stessi temi si ferma anche il breve scritto intitolato *A briefe and troue report of the new found land of Virginia* (1588) di Thomas Hariot (1560-1621), uno dei matematici maggiori del suo tempo, ammiratore di Galilei e corrispondente di Keplero. In Italia, Federico Cesi acquisterà il manoscritto del cosiddetto *Tesoro messicano* o *Rerum medicarum Novae Hispaniae thesaurus*, una monumentale raccolta di botanica e zoologia esotiche fondata sulla «relazione» di Francisco Hernández, medico di Filippo II. Dopo varie vicende editoriali, il libro verrà pubblicato da Francesco Stelluti nel 1651.

Anche sugli uomini del Nuovo Mondo e sui loro costumi Acosta si era fermato a lungo. Il suo libro, tradotto in inglese (1604), in italiano (1606), in olandese (1624) è al centro di una discussione vastissima che investe la cultura europea dalla metà del Cinquecento fino all'età di Vico. Essa ruota intorno ad alcune domande alle quali non era facile dare una risposta. Come si concilia la narrazione biblica con la presenza di uomini in un luogo così lontano dal centro della religione ebraica e cristiana? I selvaggi americani sono discendenti, ricaduti nella barbarie, di popoli un tempo civili? Oppure si danno origini differenti per i diversi popoli e gli uomini comparvero simultaneamente nelle varie regioni della Terra? Come si giustifica la diretta filiazione di tutti gli uomini da Adamo? Il diluvio universale colpì tutte le regioni della Terra? Oppure, in caso contrario, esso fu un diluvio locale? E, in questo caso, la storia narrata dalla Bibbia non diventa solo la storia di un popolo particolare? non si risolve nella narrazione di una cronaca locale? Come si spiega l'esistenza di una natura diversa da quella che ci è familiare? Come entrarono nell'Arca di Noè gli animali del Nuovo Mondo, e come ne uscirono? Perché nessun esemplare ne sopravvive nel Vecchio Mondo? Si deve pensare che Dio, dopo i sei giorni della creazione, continuò a creare quel mondo nuovo? Soprattutto: come arrivarono nel mondo nuovo gli uomini del Vecchio Mondo?

Freethinkers, *esprits forts* e libertini di varia estrazione e natura si erano largamente serviti della scoperta del Nuovo Mondo per esprimere dubbi

sulla validità del racconto biblico e per avanzare quel tipo di empie tesi alle quali si faceva riferimento, nel tardo Seicento e nel Settecento, qualificandole come lucreziane, spinoziste, materialiste. Gerolamo Cardano aveva implicitamente affermato la tesi di una generazione spontanea degli uomini dalla materia e l'aristotelico Andrea Cesalpino (1519-1603) aveva esplicitamente sostenuto che «tutti gli animali, compreso l'uomo, possono aver avuto origine dalla materia in putrefazione». Ciò, a suo avviso, poteva più specialmente essersi verificato in luoghi, come il Nuovo Mondo, di clima torrido e di sovrabbondante vegetazione. Per Giordano Bruno, la presenza di animali e uomini del Nuovo Mondo non costituiva un problema. Era, al contrario, la prova che «ogni terra produce ogni genere di animali». Attribuire agli Americani una generazione da Adamo è assurdo «e infatti non vi fu un solo primo lupo o leone o bue da cui tutti i lupi e leoni e buoi furono generati e trasmessi in tutte le isole, ma da ogni parte la terra produsse ogni cosa fin da principio». La disputa fra i difensori del poligenismo e gli assertori del monogenismo (Acosta è fra questi ultimi) era destinata a clamorosi sviluppi.

Paracelso aveva negato agli Americani caratteri umani. Come i giganti, gli gnomi, le ninfe, «essi sono simili agli uomini in ogni cosa eccetto l'anima». Sono «come le api, che hanno un loro re; come le anatre selvatiche, che hanno un capo; e non vivono secondo l'ordine delle leggi umane, ma secondo le leggi della natura innata». Anche l'umanista Juan Ginés de Sepúlveda (1490-1573), fra molti altri scrittori e filosofi e viaggiatori, aveva presentato gli indigeni americani come una sottospecie di uomini, capaci di ogni tipo di «abominevoli scelleratezze». Radicalmente diverse le affermazioni contenute in una celebre pagina degli *Essais* (1580) di Michel de Montaigne (1533-1592) che fa riferimento alle tribù brasiliane: per giudicare i popoli non europei non è possibile né lecito adottare il punto di vista europeo e cristiano. L'umanità si esprime in una infinita varietà di forme e «ognuno chiama barbarie quello che non è nei suoi usi; sembra che non abbiamo altro punto di riferimento per la verità e la ragione che le opinioni e gli usi del paese in cui siamo; ivi è sempre la perfetta religione, il perfetto governo, l'uso perfetto di ogni cosa» (1970, 272).

Le discussioni sul «buon selvaggio» e sul «cattivo selvaggio» si intrecciarono con le vicende della biologia e del pensiero politico. Fino a Buffon, all'abate Corneille de Pauw (1739-1799), ai romantici, per quanto riguarda il continente americano, resta fermo, in quella discussione, il carattere «degenerato», «decaduto» o comunque «inferiore» della *natura* del Nuovo Mondo. La fauna che lo popola, scriverà Hegel nella *Philosophie der Geschichte*, «ha un aspetto più piccolo, più debole, più imbelle».

BIBLIOGRAFIA

Testi

F. BACON, *Scritti filosofici*, a cura di Paolo Rossi, Torino, UTET, 1975.
P. BOREL, *Discours nouveaux prouvant la pluralité des mondes*, Genevae, 1657.
T. CAMPANELLA, *La Città del Sole*, a cura di N. Bobbio, Torino, Einaudi, 1941.
R. DESCARTES, *Oeuvres*, a cura di Ch. Adam e P. Tannery, Paris, Cerf, 1897-1913, 11 voll.
G. GALILEI, *Opere*, Firenze, Barbera, 1890-1909, 20 voll.
R. HOOKE, *Micrographia*, London, 1665.
ID., *Posthumous Works*, London, 1665.
L. LE ROY, *Considérations sur l'histoire universelle*, Paris, 1567.
M. DE MONTAIGNE, *Saggi*, a cura di F. Garavini, Milano, Mondadori, 1970.
B. PASCAL, *Opuscoli e scritti vari*, a cura di G. Preti, Bari, Laterza, 1959.
A. VESALIO, *Prefazione alla «Fabbrica» e Lettera a G Oporino*, a cura di L. Premuda, Padova, Liviana, 1964.

Studi

AA. VV., *L'Europa cristiana nel rapporto con le altre culture nel secolo XVII*, Firenze, La Nuova Italia, 1977.
W. BLUNT, *The art of botanical illustration*, London, Collins, 1955.
F.S. BODENHEIMER, *Towards the history of zoology and botany in the 17th century*, in *La science au XVIème siècle*, Paris, Hermann, 1960.
F. CENTORE, *Copernicus, Hooke, and simplicity*, in «Philosophical Studies», 17, 1968, pp. 185-196.
ID., *Hooke's contribution to mechanics*, The Hague, 1970.
R.S. CLAY e T.S. COURT, *The history of the microscope*, London, 1832.
M. DAUMAS, *Les instruments scientifiques au XVIIème et XVIIIème siècles*, Paris, 1953.
A.N. DISNEY, C.F. HILL, W.E. BAKER, *Origin of the telescope*, London, 1955.
L. DEFOSSEZ, *Les savants du XVIIe siècle et la mesure du temps*, Losanna, 1946.
T.K. DERRY e T.I. WILLIAMS, *Tecnologia e civiltà occidentale*, Torino, Boringhieri, 1968.
C. DOBELL, *A van Leeuwenhoeck and his little animals*, London, 1932.
M. DUCHET, *Anthropologie et histoire au siècle des lumières*, Paris, Maspero, 1971.
E.L. EISENSTEIN, *La rivoluzione inavvertita. la stampa come fattore di mutamento*, Bologna, Il Mulino, 1986.
M. ESPINASSE, *R. Hooke*, London, 1956.
L. FEBVRE e H.J. MARTIN, *L'apparition du livre*, Paris, Albin Michel, 1958.
P. FRANCASTEL, *Lo spazio figurativo dal Rinascimento al Cubismo*, Torino, Einaudi, 1957.
A. GERBI, *La disputa del Nuovo Mondo*, Milano-Napoli, Ricciardi, 1983.
G. GLIOZZI, *Adamo e il nuovo mondo*, Firenze, La Nuova Italia, 1977.
E.H. GOMBRICH, *Il mondo dell'arte*, Milano, Mondadori, 1965
ID., *Arte e illusione*, Torino, Einaudi, 1972.
H.R. HALL, *La rivoluzione scientifica 1500-1800*, Milano, Feltrinelli, 1976.
A. KOYRÈ, *Dal mondo del pressappoco all'universo della precisione*, Torino, Einaudi, 1967.
S. LANDUCCI, *I filosofi e i selvaggi*, Bari, Laterza, 1972.
A.O. LOVEJOY, *La grande catena dell'essere*, Milano, Feltrinelli, 1966.
C. MALTESE, *Il pensiero architettonico e urbanistico di Leonardo*, in *Leonardo, saggi e ricerche per le onoranze a Leonardo nel V centenario della morte*, Roma, 1954.
M. MCLUHAN, *Gli strumenti del comunicare*, Milano, Il Saggiatore, 1967.
R.L. MEEK, *Il cattivo selvaggio*, Milano, Il Saggiatore, 1981.
E. PANOFSKY, *La prospettiva come forma simbolica*, Milano, Feltrinelli, 1961.
ID., *Il significato delle arti visive*, Torino, Einaudi, 1978.
ID., *La vita e le opere di A. Dürer*, Milano, Feltrinelli, 1983.

R. ROMEO, *Le scoperte americane nella coscienza italiana del Cinquecento*. Milano-Napoli, Ricciardi, 1954.
V. RONCHI, *Il cannocchiale di Galilei e la scienza del Seicento*, Torino, Einaudi, 1958.
S.H. STEINBERG, *Cinque secoli di stampa*, Torino, Einaudi, 1968.
L. THORNDIKE, *Novità e innovazione nella scienza e nella medicina del Seicento*, in PH. WIENER e A. NOLAND, *Le radici del pensiero scientifico*, Milano, Feltrinelli, 1971.
A. WOLF, *A history of science, technology and philosophy in the 16th and 17th centuries*, London, 1950.

V. *Antichi paradigmi e nuovi metodi geometrici*

(di UMBERTO BOTTAZZINI)

1. *La riscoperta dei classici.*

Verso il 1475 si era stabilito a Venezia un nobiluomo di Augsburg, Erhard Ratdolt (1443?-1528?), che in patria aveva imparato l'arte di Gutenberg. Nella capitale veneta Ratdolt aveva impiantato una bottega di stampatore che doveva divenire ben presto famosa. A lui si era rivolto Regiomontano per la stampa del suo calendario e per i suoi tipi usciva, nel 1482, la prima edizione a stampa degli *Elementi* di Euclide, dedicata al principe Mocenigo e illustrata da numerose figure, come sottolineava con legittimo orgoglio lo stesso editore. Ratdolt riproduceva una delle più note versioni degli *Elementi*, quella commentata da Giovanni Campano (XIII sec.) che si era visibilmente avvalso della traduzione araba del testo euclideo.

Non erano certo mancate nel Medioevo e in tempi più recenti, per opera di dotti e umanisti, le edizioni commentate di Euclide (di Megara, come comunemente allora si riteneva, confondendo il matematico autore degli *Elementi* vissuto nel III secolo a.C. coll'omonimo filosofo megarense del IV secolo a.C.). Né erano mancate edizioni di altri matematici classici. L'invenzione della stampa moltiplicava ora in maniera straordinaria le possibilità di diffusione dei libri, mettendo a disposizione di pittori e architetti, artigiani, ingegneri civili e militari le conoscenze geometriche e meccaniche raggiunte dalla scienza classica. All'Euclide di Ratdolt si affiancarono così ben presto numerose ristampe e riedizioni degli *Elementi*, più spesso in latino ma non raramente in volgare.

Di «Euclide Megarese Philosopho solo introduttore delle Scientie

Mathematiche diligentemente reassettato et alla integrita ridotto» curava la prima edizione italiana (1543) Nicolò Tartaglia, «per commune commodo et utilita di latino in volgar tradotto». Lo stesso matematico bresciano pubblicava, sempre nel 1543, un'edizione latina dei libri di Archimede, che tuttavia molto verosimilmente era una semplice trascrizione della traduzione latina fatta da Wilhelm von Moerbecke (?-1281?).

In Germania appariva nel 1562 una traduzione tedesca degli *Elementi* curata da Wilhelm Holzmann, meglio noto come Xylander (1532-1576); profondo conoscitore del greco classico e professore di logica aristotelica ad Heidelberg, Xylander fece stampare a Basilea (nel 1575) anche una traduzione latina dei libri aritmetici di Diofanto, che Bombelli aveva conosciuto da un manoscritto della biblioteca vaticana e Xylander aveva tradotto da un codice avuto dall'inviato dell'imperatore alla corte polacca.

Alla prima edizione in lingua inglese degli *Elementi* (1570) curata da sir Henry Billingsley aveva contribuito in maniera determinante John Dee (1527-1608), singolare figura di matematico e filosofo avventuroso e cosmopolita, seguace di Paracelso e, nell'ultima parte della sua vita, cultore di magia naturale. Preceduto dalla sua fama, Dee fu chiamato ad insegnare in diverse città europee, dopo aver lasciato la nativa Inghilterra a soli 21 anni. Nel 1550 gli studenti che assistevano alle sue lezioni a Parigi, come racconta egli stesso, erano talmente numerosi che non potendo essere tutti contenuti nell'aula, si affollavano alle finestre per poterlo almeno vedere e sentire. Trascorse qualche tempo in Germania al servizio di Massimiliano II prima di comparire ad Urbino nel 1570 al fianco di Commandino. Insieme, i due predisposero per la stampa la traduzione dall'arabo compiuta da Dee del testo euclideo *Sulla divisione delle figure*, di cui non ci è pervenuto l'originale greco. Euclide vi trattava della divisione di figure piane secondo rapporti dati mediante rette soggette a opportune condizioni.

Federico Commandino (1509-1575) godeva allora di fama straordinaria per le sue edizioni critiche degli autori classici, cui dedicò tutta la vita, dopo gli studi compiuti a Padova e a Ferrara. A lui si devono tra l'altro le versioni latine delle *Collezioni matematiche* di Pappo, l'opuscolo *Su le grandezze e le distanze del sole e della luna* di Aristarco di Samo, l'unico scritto pervenutoci del «Copernico dell'antichità», il *Planisferio* di Tolomeo, che contiene le idee fondamentali della proiezione stereografica e che Commandino arricchì di commentari sui princìpi geometrici del metodo della prospettiva inventato dagli artisti del Quattrocento, gli scritti cosmografici di Giordano Nemorario e le opere meccaniche di Erone, oltre a versioni, in latino e in italiano, degli *Elementi* euclidei. Ma fu soprattutto lo studio assiduo del «sovrumano» Archimede, di cui curò anche un'edizione delle opere, ad ispirare la ricerca geometrica di Commandino: nello stesso anno 1565 in cui dava alle stampe lo

scritto archimedeo sui *Galleggianti*, Commandino pubblicava un proprio *Liber de centro gravitatis solidorum* che fu a lungo considerato il testo più autorevole sull'argomento.

Nella prefazione dedicata al cardinale Alessandro Farnese, Commandino si richiamava esplicitamente al grande Siracusano per motivare il proprio interesse per la «perdifficilis et perobscura quaestio de centro gravitatis corporum»: Archimede, il «princeps mathematicorum», ha lasciato numerosissime e profonde pagine sul problema della determinazione del baricentro delle figure piane, «ma nei suoi libri non si trova parola sulla determinazione del centro di gravità dei solidi». Ecco dunque che l'opera di Commandino si presenta come il tentativo di portare a compimento il programma archimedeo, di cui lo stesso Siracusano aveva mostrato la grande fecondità *in geometria*, quando aveva trovato per via meccanica coll'uso del principio della leva che la quadratura dell'arco di parabola è 4/3 dell'area del triangolo iscritto nell'arco, riconducendo di fatto il problema della quadratura a quello della determinazione del baricentro di un triangolo.

D'altra parte il problema della determinazione del centro di gravità dei solidi — la *Centrobaryca*, come finirà per essere allora chiamato questo capitolo della meccanica (e della geometria) — rivestiva un'evidente importanza pratica sia nell'architettura sia nell'ingegneria civile, militare e nautica.

Un'attenta lettura dei *Galleggianti* rivelava inoltre che Archimede era certo a conoscenza del baricentro del paraboloide di rotazione e, insieme agli altri scritti archimedei, poneva ai matematici e ai commentatori la difficile questione del metodo usato dal grande geometra per scoprire i suoi teoremi. Come aveva potuto Archimede trovare il rapporto fra la sfera e il cilindro e i volumi dei solidi di rotazione (*Conoidi e sferoidi*), visto che il metodo di esaustione, da lui sistematicamente usato in quest'ultimo come negli altri suoi trattati, consentiva sì di dare dimostrazioni ineccepibili dal punto di vista del rigore ma non forniva alcun indizio sul modo di scoprire i risultati? La quadratura della parabola per via meccanica sembrava suggerire ai geometri cinquecenteschi una possibile «via regia alla geometria». L'opera di Commandino, come quella dei suoi contemporanei e seguaci, si colloca in un più ampio programma di ricostruzione (e talora «divinazione») della geometria classica, che animò gran parte della ricerca geometrica rinascimentale.

Nel *Liber de centro gravitatis solidorum* Commandino riusciva nella determinazione del baricentro della piramide, del cono e dei loro tronchi (i solidi compresi fra due sezioni piane e parallele alla base del solido), del conoide parabolico (come allora era chiamato il paraboloide di rotazione) ma lasciava irrisolta la questione per numerosi solidi (l'iperboloide e l'ellissoide

di rotazione, per esempio) dei quali Archimede aveva pur insegnato a calcolare il volume.

Commandino aveva ritardato per qualche tempo la pubblicazione del suo libro sui baricentri quando aveva avuto notizia che Francesco Maurolico (1494-1575) stava preparando un analogo trattato su Archimede, «in quo vir ille doctissimus et in eis disciplinis exercitatissimus» prometteva di affrontare lo stesso tipo di questioni. Tuttavia la necessità di chiarire alcuni punti di incerta interpretazione dei *Galleggianti* e l'inutilità dell'attesa avevano poi convinto Commandino dell'opportunità della pubblicazione. In essa egli si serviva comunque di notizie avute per lettera da Maurolico, con il quale era entrato in contatto epistolare probabilmente attraverso il comune protettore, il cardinale Farnese. L'*Archimede* di Maurolico, che comprendeva la traduzione di alcuni scritti del geometra siracusano arricchiti di note, commenti e aggiunte di Maurolico, dopo una travagliata vicenda e gli inutili sforzi di Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), doveva vedere la luce solo nel 1685.

Figlio di Antonio Marulì, un greco che era riuscito a sfuggire al sacco di Costantinopoli riparando in Sicilia, il messinese Francesco Maurolico (come aveva deciso di farsi chiamare) fu forse il più grande geometra del Cinquecento. Profondo conoscitore della matematica greca, curò l'edizione di un gran numero di testi classici, la maggior parte dei quali rimase manoscritta, nonostante gli sforzi di Maurolico di veder stampati i frutti del suo lavoro. Corresse gli errori (a cominciare dall'errata identificazione di Euclide col filosofo megarense) e le vistose incomprensioni matematiche presenti nelle più note versioni degli *Elementi*, da quella di Campano alla contemporanea edizione di Bartolomeo Zamberti (1473?-?) che a suo dire «paucam vel nullam mathematicae facultatis peritiam tenet».

Per Maurolico, non si tratta solo o tanto di «restaurare» antichi testi, spesso lacunosi, pieni di errori e oscurità che avrebbero reso assai ardua se non addirittura vana la fatica degli stessi autori dell'antichità, quanto di integrare, chiarire dal punto di vista matematico, non raramente aggiungere del nuovo e talora «divinare» le parti mancanti e andate perdute, in uno sforzo di comprensione e ricostruzione che va ben oltre la restaurazione filologica dei testi.

Coerente con questo «programma» e consapevole del carattere progressivo della matematica, Maurolico cercò non solo di liberare la scienza della geometria dalle incertezze e dagli errori ereditati dalle *traditiones* medioevali, ma di estenderne il patrimonio, aggiungendo nuove scoperte e più eleganti dimostrazioni a quanto avevano tramandato gli Antichi.

Paradigmatico fu il suo sforzo di «divinare» il contenuto degli ultimi libri delle *Coniche* di Apollonio che si credevano irrimediabilmente perduti e che apparvero a stampa solo nel 1654, a complemento della sua edizione dei

primi 4 libri, così come la sua edizione degli scritti di Archimede. Qui per esempio Maurolico affrontava con successo la questione della determinazione del baricentro dei solidi (piramide, sfera, paraboloide di rotazione) e proponeva una nuova quadratura della circonferenza, accanto a quella archimedea del *De mensura circuli*, dopo aver criticato la quadratura mediante lunule usualmente attribuita a Ippocrate di Chio (V sec. a.C.). Significativamente Maurolico suggeriva, nel corso del suo argomento dimostrativo, di ricorrere ad una procedura meccanica (il filo a piombo e la sospensione della figura) per determinare il baricentro di un settore circolare.

Egli era ben consapevole della natura empirica della procedura proposta, ma d'altra parte era altrettanto convinto dell'impossibilità in generale di ottenere quadrature solo per via geometrica. In una lettera al viceré di Sicilia Juan de Vega motivava aristotelicamente la sua opinione coll'irriducibile «inimicitia inter rectam flexamque lineam» che fa sì che non si possano dare proporzioni «nominabiles» tra esse: per quanto avanti si spinga il calcolo del rapporto fra circonferenza e diametro, per quanti poligoni circoscritti e inscritti alla circonferenza si considerino, non si perverrà mai ad un rapporto esatto, «numquam tamen ipsum praecise consequi [possumus]».

Si apprezza meglio la modernità di questa affermazione se si pensa che al problema della quadratura del cerchio e della determinazione «esatta» di π dedicarono inutilmente il loro sforzi per molto tempo ancora non pochi «quadratori del cerchio». Il più noto fra essi fu forse Ludolph van Ceulen (1540-1610), maestro di scherma ad Amsterdam e poi professore alla scuola del genio fondata a Leida da Maurizio di Nassau. Straordinario calcolatore, considerando un poligono regolare di 2^{62} lati riuscì a determinare i primi 35 decimali di π, un risultato che egli orgogliosamente volle inciso sulla sua tomba.

Nella vasta produzione scientifica di Maurolico, il cui elenco occupa tre pagine a stampa, figurano anche due trattati di ottica geometrica, *Photismi de lumine et umbra* (1521) e *Diaphaneon sive transparentium* (1554). Nel primo egli discute della prospettiva teorica, della formazione delle immagini e della geometria dei raggi luminosi, mentre nel *Diaphaneon* si sofferma sui fenomeni della visione, della formazione dei colori e dell'arcobaleno e, valendosi delle scoperte anatomiche di Andrea Vesalio, tratta della funzione delle varie parti dell'occhio. Pur manoscritte, queste opere di Maurolico conobbero una grande diffusione prima di essere stampate nei primi anni del Seicento a cura di Clavio (1537-1612).

La fama crescente del geometra messinese richiamava infatti «fino da rimotissime contrade, personaggi di merto e di valore», come assicurava il suo primo biografo, il nipote Francesco, barone della Foresta di San Giorgio. «Vennevi entiandio il Clavio», come era noto col nome latinizzato secondo il

costume dell'epoca il «giesuita celeberrimo» di Bamberg Cristoph Schlüssel, che a Messina «lesse» il V° e il VI° libro degli *Elementi* euclidei e al ritorno a Roma nel 1574 portò con sé copia dei trattati di ottica di Maurolico per farli stampare. Professore di matematica al Collegio dei gesuiti e geometra tra i più autorevoli alla fine del '500, all'opera di Maurolico Clavio si ispirò in più luoghi della sua edizione degli *Elementi*, che apparve a Roma nel 1574 e conobbe rapida fama e numerose riedizioni.

Protagonista della sua epoca, l'«Archimede del Rinascimento», come fu talvolta chiamato Maurolico, ne visse pienamente entusiasmi e contraddizioni: se da un lato esortava allo studio appassionato e alla riappropriazione del patrimonio delle conoscenze matematiche dei classici, apertamente riconoscendone il carattere di verità certa di fronte all'ignoranza che vedeva regnare in quasi tutte le «scienze» contemporanee, d'altro lato rimase ostinatamente cieco di fronte alle radicali novità che in astronomia rivoluzionavano il quadro teorico degli Antichi. Grandissima fama raggiunse la sua *Cosmographia* (1543) in cui, apertamente ispirandosi all'autorità di Tolomeo, discuteva della forma dei cieli e del moto degli astri secondo le dottrine dell'Almagesto. La fiducia nella correttezza del sistema tolemaico non fu neppure incrinata dall'apparizione del *De revolutionibus* di Copernico: nel *De sphera liber unus* (1575), un trattatello sul computo ecclesiastico inserito nei suoi *Opuscula mathematica*, lamentando che si tollerasse anche Niccolò Copernico, «qui solem fixum ac terram in girum circumverti posuit», non esitava a scrivere che «scutica potius ac flagello, quam reprehensione dignus est», è degno di scudiscio e di frusta, piuttosto che di riprovazione.

Non meno sommario e crudo il giudizio riservato ad Erasmo, «il parasita di Roterdam» di cui Maurolico assistette sdegnato ai successi mondani a Roma nel 1525, in una delle rare occasioni in cui lasciò la nativa Messina: sempre indulgente coi luterani, chiamato poeta «propter insulsa quaedam carmina», ma non certo filosofo essendo «physicae totius ac mathematicae professionis ignorantissimus».

Erasmo come Copernico, come Nostradamus, Sacrobosco e per molti versi Cardano e ogni sorta di negromanti e cabalisti, vaticinatori, astrologi e alchimisti: tutti «abominandos insaniarum professores» — scriveva ai legati del concilio tridentino — accomunati nel disprezzo di Maurolico a causa della loro ignoranza della matematica classica, fondamento autentico di ogni conoscenza certa.

2. *La prospettiva e le meccaniche.*

Per quanto autorevole fosse la figura di Maurolico e imponente il programma scientifico da lui portato a compimento, il suo relativo isola-

mento a Messina e soprattutto il ritardo con cui comparve a stampa gran parte delle sue opere ne limitarono sensibilmente l'effettiva influenza sui contemporanei. Attorno a Commandino, al contrario, si riunì una vera e propria scuola, che fece di Urbino e della corte dei Montefeltro un luogo di incontro di matematici e umanisti, eruditi, poeti e artisti e un importante centro della cultura scientifica.

Al periodo dei loro studi con Commandino risaliva l'«antichissima amicitia» che legò Guidobaldo dal Monte (1545-1607) a Torquato Tasso, il poeta che per un quinquennio (dal 1573) «lesse» gli *Elementi* di Euclide allo Studio di Ferrara. Alla scuola di Commadino, «il vecchio e saggio Uranio», si formò anche Bernardino Baldi (1553-1617). Abate di Guastalla, traduttore degli *Automata* di Erone e dell'VIII libro delle *Collezioni* di Pappo, Baldi fu poi chiamato a Mantova come Matematico del Principe al servizio di Ferrante Gonzaga.

Autore di oltre un centinaio di opere di carattere matematico e letterario, di epigrammi, bucoliche e liriche, Baldi si lamentava di aver avuto «questa disgrazia che le cose leggere, come curiose e facili da stampare, mi sono state levate di mano, ma le serie, che vogliono spese, mi sono restate, in preda alle tarme». Tra queste i suoi commenti alla meccanica di Aristotele e le *Vite de' matematici*, l'opera cui è maggiormente affidata la sua fama e che fu pubblicata in parte solo in epoche successive.

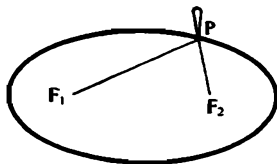
Scritte tra il 1587 e il 1595 e ispirate alle *Vite* di Plutarco e alle *Vite di filosofi* di Diogene Laerzio, oltre che ai primi libri di carattere storico delle più recenti e imponenti *Scholae mathematicae* di Pietro Ramo (1515-1572), le *Vite* di Baldi raccolgono le biografie di 201 matematici, da Talete a Clavio, e rivelano la straordinaria erudizione del loro autore. «Si scrivono le vite de' Grammatici, de gli Oratori, de' Sofisti, de' Pittori e di altre genti di minor conto, e non si scriveranno quelle de' Matematici, da l'industria de' quali il Mondo ha imparato di conoscere i movimenti, i numeri, e le grandezze de' cieli, i giri de le stelle, le ragioni de l'eclissi ... e tante altre cose degne in tutto di maraviglia e di lode?» si domandava Baldi nella premessa *A' lettori* della sua enciclopedica impresa.

Certo c'è della retorica nelle parole di Baldi, ma i matematici, nell'ampia accezione cinquecentesca del termine, sono davvero tra i protagonisti della vita civile che anima le città e le corti del tempo. Sono loro, continuava Baldi, che hanno «descritto le terre et i mari», misurato «il larghissimo aspetto de l'universo», spiegato «quanto giri il maggior cerchio del globo terreno» e insegnato al mondo «le cagioni de l'apparenze de l'iridi, de gli haloni, le altezze de le nuvole e de' vapori, le maraviglie de gli specchi» e ancora «le ragioni de gli artifitiosi inganni de la Perspetiva» e il fabbricar «legni marittimi» e «machine offensive e diffensive».

È questa l'immagine della matematica, campo di «contemplationi purissime» e di «maraviglie» applicative, che Baldi ha assimilato dallo studio intrapreso con Commandino e, alla sua morte, «gagliardamente» proseguito valendosi della «dottissima conversatione» di Guidobaldo, il «ricchissimo erede» della scienza del maestro.

Nato a Pesaro da nobile famiglia, Guidobaldo dal Monte fu infatti il più autorevole e influente rappresentante della scuola di Commandino, con cui il gentiluomo marchigiano completò la propria formazione matematica dopo un iniziale periodo di studi a Padova. Nella sua vita Guidobaldo interpretò pienamente il ruolo del matematico, che abbiamo visto tratteggiato da Baldi: uomo di cultura, e insieme partecipe delle vicende politiche e militari dell'epoca, troviamo Guidobaldo in Ungheria nel 1566 impegnato nella guerra contro i turchi e qualche anno dopo sulla via di Lepanto, ancora contro i turchi e in seguito in Toscana, sopraintendente alle fortezze del Granduca. Lasciata infine ogni carica pubblica, trascorse gli ultimi tempi della sua vita nel castello di Montebaroccio, dedicandosi agli studi matematici.

La prosecuzione e il completamento dell'opera del maestro rappresentò uno dei principali motivi conduttori dell'attività matematica di Guidobaldo. Al trattato di Commandino sui centri di gravità si ispirò così nel suo *Mechanicorum liber* (1577) che fu ben presto tradotto in volgare da Filippo Pigafetta. In quest'opera, scriveva Pigafetta nella presentazione, Guidobaldo «risuscitava a chiara luce la Mechanica dalle oscure tenebre ove giaceva sepolta».

A questa prima, faceva seguito la *Planispheriorum universalium theorica* (1579), un'opera in cui Guidobaldo trattava delle trasformazioni geometriche delle figure piane e della costruzione di strumenti per tracciare le coniche, insegnando tra l'altro la costruzione della cosiddetta «ellisse del giardiniere», ottenuta facendo ruotare un piolo trattenuto da una corda fissa in due punti (fuochi):

Il capitolo della geometria più ricco di immediate risonanze pratiche era tuttavia quello della prospettiva. Commentando il *Planisferio* di Tolomeo,

Commandino aveva insegnato a determinare la prospettiva di un punto su due piani ortogonali tra loro e a tracciare le proiezioni su un piano dei cerchi di una sfera. La trattazione di Commandino doveva sembrare tuttavia agli artisti dell'epoca difficoltosa e incompleta a giudicare dal successo allora ottenuto da *La pratica della prospettiva, opera molto profittevole a pittori, scultori e architetti* (1559) del patriarca di Aquileia Daniele Barbaro (1513-1570), ispirata al quattrocentesco trattato di Piero della Francesca e soprattutto da *Le due regole della prospettiva pratica* del celebre architetto Iacomo Barozzi da Vignola (1507-1573). Le *Due regole* furono largamente usate ancora manoscritte nelle botteghe dei pittori, prima di essere stampate a Roma nel 1582 con commenti e correzioni di Egnatio Danti (1537-1586) e conoscere quindi una rapida diffusione per tutto il Seicento anche in Europa, grazie alle numerosissime traduzioni e ristampe.

Al chiarimento di alcuni aspetti teorici della prospettiva e alla correzione di errate procedure da parte degli artisti era dedicata anche la seconda parte del *Diversarum speculationum liber* (1585) di Giovanni Battista Benedetti (1530-1590), un nobiluomo che a Venezia era stato allievo di Tartaglia e, giovanissimo, si era messo in luce per l'opuscolo *Resolutio omnium Euclidis problematum aliorumque ad hoc necessario inventorum una tantummodo circini data apertura* (1553).

A dispetto del titolo, si tratta di una raccolta di 54 semplici problemi euclidei, come per esempio innalzare la perpendicolare ad una retta in un punto, dividere a metà un segmento dato o condurre la perpendicolare ad una retta da un punto e costruire il medio proporzionale fra due dati segmenti, problemi che Benedetti risolve geometricamente con la sola riga e il compasso ad apertura fissa.

Le conoscenze teoriche e pratiche, che nel campo della prospettiva si erano venute affermando nel corso del Cinquecento per opera di pittori, architetti e matematici, vennero raccolte da Guidobaldo nei *Perspectivae libri sex* (1600), un trattato organico scritto nell'intento di fornire un fondamento geometricamente rigoroso a numerosi risultati fino ad allora basati sulla semplice evidenza empirica. Guidobaldo dimostrava per esempio che proiettando centralmente un fascio di rette parallele si ottiene un fascio di rette concorrenti in un punto, o che i punti di concorso delle proiezioni di fasci di rette parallele tra loro ed a uno stesso piano cadono su una stessa retta. Una dimostrazione di cui Guidobaldo doveva essere particolarmente orgoglioso, tanto che la volle illustrata graficamente in un'incisione che arricchisce il frontespizio della sua opera. Attento anche alle applicazioni, Guidobaldo mostrava, nel libro V, come si potessero trovare le ombre di figure poste comunque nello spazio, mentre l'ultimo libro costituiva un'esposizione pratica delle regole da usarsi nella scenografia. «I metodi per

rappresentare su un piano le figure a tre dimensioni toccarono un livello così elevato che ben poco rimaneva da aggiungervi per toccare l'altezza a cui essi arrivano oggi» scriveva Loria (1950, 362) commentando l'opera di Guidobaldo.

La sistemazione teorica della prospettiva, un capitolo della geometria sconosciuto agli antichi, si accompagnava in Guidobaldo alla ripresa della tradizione archimedea in geometria e meccanica, che aveva intrapreso nel *Liber Mechanicorum* e portato a compimento nella *In duos aequiponderantium libros paraphrasis* (1588). Dedicata ai fondamenti della meccanica, la *Paraphrasis* rappresentava il tentativo di Guidobaldo di individuare una linea di continuità tra la *Mechanica* aristotelica e la scienza archimedea. Così per esempio, scriveva Guidobaldo, quando Aristotele cerca di spiegare l'uso della leva afferma giustamente che con essa si possono innalzare grandi pesi quando si esercita una forza opportuna all'estremità del braccio più lungo, con ciò basandosi sul suo principio che cose più lontane dal centro hanno maggior *virtus* (forza). Archimede accetta questa spiegazione, e questo principio, che cerca di quantificare in termini matematici, pervenendo così alla legge che i pesi in una leva in equilibrio sono in proporzione inversa rispetto alle distanze dal fulcro, ciò che, a parere di Guidobaldo, era il vero e solo fondamento della meccanica.

D'altra parte Archimede si era limitato a tradurre in termini matematici i princìpi della statica aristotelica, non affrontando affatto problemi di dinamica e, come ha osservato Rose (1975, 235), «l'incorporare Aristotele, come fa Guidobaldo, nella tradizione archimedea e la sua insistenza sulla separazione tra statica e dinamica erano pregiudizi che si rinforzavano continuamente l'un l'altro».

Guidobaldo affidò alle pagine manoscritte delle *Meditatiunculae de rebus mathematicis* le sue opinioni sulla dinamica, discutendo in particolare del moto dei proietti. La validità o meno dei princìpi aristotelici della dinamica — uno degli argomenti centrali dei *Discorsi* galileiani — era all'epoca oggetto di vive discussioni, come mostrano ad esempio le pagine delle *Diversarum speculationum* di Benedetti.

Risolutamente copernicano e fiducioso nell'«incrollabile base della filosofia matematica», in altre parole nell'impostazione archimedea, Benedetti condusse nella sua opera un'appassionata e radicale (anche se non sempre lucida) critica della dinamica aristotelica. Le sue riflessioni sul moto naturale e violento, sugli effetti della densità e della rarefazione dell'aria, sulla velocità dei proietti e sulla loro traiettoria, sull'inconcludenza della dimostrazione aristotelica dell'impossibilità del vuoto, non dovettero essere ininfluenti sul giovane Galileo. Questi, nel periodo pisano, cercò infatti di «sviluppare in modo coerente e completo la dinamica della "forza impressa" — del-

l'*impetus*» affrontata da Benedetti e, nel medesimo tempo, «si sforz[ò] di portare fino al limite estremo la matematizzazione, o meglio, l'archimedizzazione della fisica» (Koyré [1966], 1976, 55) di cui Guidobaldo e Benedetti avevano posto le premesse.

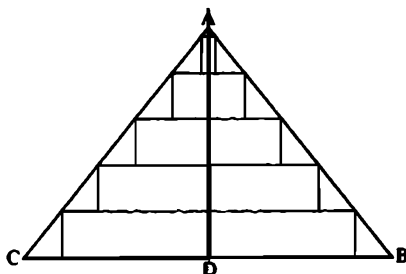
È al «sovrumano Archimede» che Galileo si ispira nei suoi primi scritti — nella *Bilancetta*, un lavoro sulla bilancia idrostatica, e nel *De motu* e nello studio dei baricentri dei corpi, intrapreso «ad istanza dell'Illustrissimo Sig. Marchese Guid'Ubaldo dal Monte grandissimo matematico dei suoi tempi» nella convinzione che «quello, che in tal materia haveva scritto Federigo Commandino, non mancasse di qualche imperfezione». Delle proposizioni ottenute Galileo inviò copia a Guidobaldo — forse conosciuto durante il suo soggiorno in Toscana quand'era al servizio del Granduca — «col pensiero di andar seguitando cotal materia anco ne gli altri solidi non tocchi dal Commandino». Progetto dal quale fu poi distolto per «essersi incontrato dopo alcun tempo nel Libro del Sig. Luca Valerio, massimo geometra, e veduto come egli risolve tutta questa materia senza niente lasciar indietro». Galileo rinviava così la pubblicazione dei suoi teoremi all'*Appendice* dei *Discorsi*, benché «le aggressioni sue siano per strade molto diverse da quelle del Sig. Valerio» (Galileo 1638, 288).

Le ricerche di statica geometrica erano dunque verso la fine del Cinquecento di grandissima attualità in Italia e oltralpe. Nei Paesi Bassi per esempio Stevin andava conducendo ricerche sulla caduta dei gravi e sul piano inclinato, di cui tuttavia non era giunta notizia né a Galileo né a Guidobaldo o a Valerio. Pubblicate in fiammingo nel 1586, le scoperte di Stevin dovevano diventare largamente note solo postume nel 1634 nella versione francese di Girard, dopo che nel 1608 ne era stata data una traduzione latina da Snellius.

Contemporanei alle sue ricerche di statica erano anche i sei libri sulla geometria pratica, anch'essi in seguito tradotti in francese, dove Stevin (cfr. il cap. III di questo volume) trattava delle costruzioni geometriche, ritrovando per l'ellisse metodi che erano noti anche a Guidobaldo. Ancora indipendenti dall'opera di Guidobaldo erano i profondi risultati ottenuti da Stevin nel campo della prospettiva, tra cui merita di essere segnalata la sua soluzione, seppur limitata ad alcuni casi particolari, del problema inverso della prospettiva: date due figure nel piano, in una posizione qualunque, che sono l'una la prospettiva dell'altra, determinare la loro posizione nello spazio e la posizione del centro di proiezione, in modo tale che la prospettiva sia effettivamente realizzata. Stevin esibiva la soluzione per il caso di un parallelogrammo e un quadrilatero nel primo libro del suo *Traité d'optique*, significativamente intitolato «Scénographie, vulgairement dite Perspective».

Attento alle applicazioni pratiche della matematica, Stevin non esita ad affrancarsi dalla rigida tradizione archimedea e a sostituire metodi più

flessibili ai rigorosi argomenti dimostrativi del Siracusano, basati sul metodo di esaustione, che ogni volta imponeva il passaggio per una dimostrazione per assurdo (se si mostra che non può essere A < B e neppure A > B, si deve concludere che è A = B è infatti lo schema dimostrativo di tale metodo).

Così per esempio nella *Statique*, per provare che il baricentro di un triangolo sta sulla mediana AD, Stevin aveva considerato dei parallelogrammi di uguale altezza iscritti in numero qualunque nel triangolo ABC (v. figura).

Il baricentro dello «scaloide» iscritto sta sulla sua mediana, aveva osservato Stevin, riprendendo l'argomento archimedeo della simmetria bilatera della figura già usato dal Siracusano nella dimostrazione del principio della leva. D'altra parte, aumentando il numero dei parallelogrammi iscritti, la differenza tra gli «scaloidi» così ottenuti e il triangolo sarà sempre più piccola, fino ad essere minore di ogni grandezza data. A questo punto, come per la determinazione del baricentro del segmento parabolico e del conoide iperbolico, Stevin faceva ricorso al principio seguente, espresso nella forma di un sillogismo «baroco»:

A. Tra tutti i pesi (*pesanteurs*) che differiscono tra loro, se ne può assegnare uno minore della loro differenza.

O. Tra il peso di ADC e di ADB non si saprà assegnare un peso minore della loro differenza.

O. I pesi di ADC e ADB non differiscono tra loro.

Dunque i «pesi» dei due triangoli ADC e ADB sono uguali, e il baricentro di ABC sarà quindi sulla mediana.

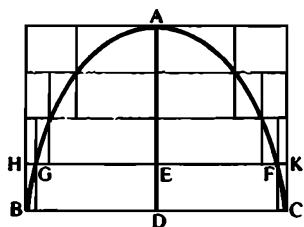
Di tutt'altra natura erano gli argomenti usati da Luca Valerio (1552-1618), il matematico che Galileo nei *Discorsi* non esita a chiamare il «nuovo Archimede dell'età nostra». È vero che Valerio, allievo di Clavio come egli scrive e forse attraverso il maestro, sensibile ai metodi di Maurolico, aveva in un suo primo scritto, il *Subtilium indagationum liber* (1582), fatto ricorso al

filo a piombo (il «perpendiculum») per trovare la quadratura di classi di figure curvilinee: «se infatti la costruzione geometrica è sicura, questa che si esegue col *perpendiculum* che non chiamerei strumento meccanico ma anzi, naturale, deve sembrare a chi è, non dico intelligente, ma sano di mente, la più sicura di tutte» (in Napolitani 1982, 24) scriveva Valerio nel *Subtilium indagationum*. Nell'opera, che recava il significativo sottotitolo di *quadratura circuli et aliorum curvilineorum* Valerio, contrariamente a Maurolico e in aperta polemica con Aristotele, affermava che «datae cuicumquae curvae, linea recta aequalis esse potest» e dunque sbaglia Aristotele e chi si richiama alla sua autorità sostenendo che il moto circolare non è confrontabile col rettilineo «quia linea circularis non comparatur rectae»: quelli che lo affermano «vel mentiuntur conscii vel non sunt ita acuti ut suspicantur».

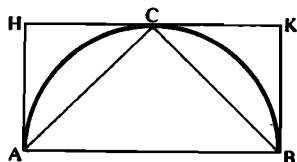
Ma lo stesso Valerio, negli anni successivi, abbandonò la convinzione nella correttezza dimostrativa del proprio metodo così come i toni della polemica antiaristotelica e nel *De centro gravitatis solidorum*, il volume apparso a Roma nel 1604 quando Valerio era lettore di greco antico e di matematica alla Sapienza e al quale si riferisce Galileo, del *perpendiculum* non si trova alcuna traccia. La generalità e la purezza della geometria non può affidarsi ad uno strumento meccanico come il filo a piombo, ma è la teoria delle grandezze e delle proporzioni che ha insegnato Euclide nel V e nel VI libro degli *Elementi* a costituire, come egli scrive, «la via regia» su cui «con rigore e generalità» è stata posta «una gran parte della geometria (e assai difficile)».

Il metodo adottato da Valerio per quadrare le figure e trovare il baricentro di solidi «senza niente lasciare indietro» era basato sulla dimostrazione di due proposizioni fondamentali «che solo di per sé dovrebbero trovare un posto nella geometria». Nella prima egli afferma che se A, B e C, D sono quattro grandezze e si possono assegnare due altre grandezze H e K, sempre maggiori (o minori) di A e B rispettivamente e da queste differenti per un eccesso (o un difetto) più piccolo di ogni grandezza assegnabile, e tali inoltre che H:K = C:D, allora sarà A:B = C:D. Una proposizione in cui molti commentatori moderni hanno voluto vedere anticipato un risultato notevole della teoria dei limiti, nel cui linguaggio si lascia tradurre senza difficoltà l'asserto di Valerio.

A questa prima di carattere generale si affianca una seconda proposizione, che Valerio usa sistematicamente in luogo dell'esaustione archimedea nella quadratura delle figure piane: «ad ogni figura *circa diametrum in alteram partem deficienti* si può iscrivere una figura qualunque composta di parallelogrammi di uguale altezza e circoscrivere un'altra analoga, in modo tale che la figura circoscritta superi quella iscritta di uno spazio minore di una grandezza qualunque assegnata» (Valerio 1604, 13-14).

Che cosa intende Valerio con le condizioni poste alla figura? Anzitutto, una figura *circa diametrum* «è quella in cui una retta, che si chiama diametro della figura, divide a metà tutte le rette parallele ad una assegnata e limitata dalla figura stessa», mentre alla richiesta *in alteram partem deficienti* corrisponde il fatto che le corde parallele alla retta considerata (la BC del disegno) diminuiscano in lunghezza allontanandosi da essa.

La combinazione di questi due princìpi pone nelle mani di Valerio uno strumento di grande efficacia ed eleganza per la quadratura di una vasta classe di figure, di cui il segmento parabolico di Archimede rappresenta solo un caso particolare; ed è questo stesso strumento che applica con successo due anni più tardi nel *Quadratura parabolae*, mostrando per esempio che due segmenti di parabole stanno tra loro come i rispettivi triangoli iscritti.

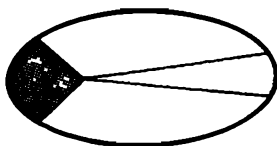
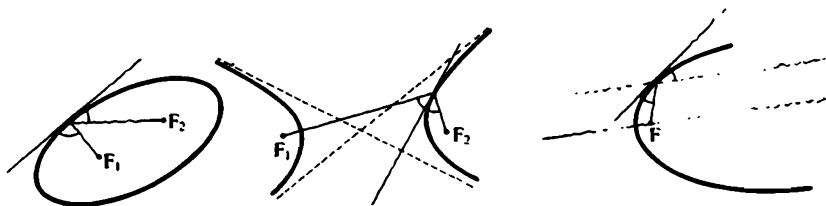
La dimostrazione di un principio analogo a quello per le figure *circa diametrum* consente inoltre a Valerio di ottenere nel calcolo dei baricentri cose «prima di lui mai tentate da nessuno», cioè la determinazione del centro di gravità di solidi dotati di asse (*circa axim*) come il conoide iperbolico o l'emisferoide. «Ad ogni solido *circa axim in alteram partem deficienti*, la cui base sia un cerchio o un'ellisse — afferma infatti Valerio — si può iscrivere una figura qualunque composta di cilindri o di porzioni di cilindri di uguale altezza e circoscrivere una figura analoga, in modo tale che la circoscritta superi l'iscritta di un eccesso minore di una grandezza qualunque assegnata» (Valerio 1604, 23-24).

Egli applica questo principio alla determinazione del volume e del baricentro di solidi, tra cui in particolare la semisfera e il cono iscritto in essa. Egli dimostra che la semisfera è doppia del cono e equivalente ai due terzi del cilindro circoscritto.

E sarà proprio a questa dimostrazione di Valerio che si richiamerà Galileo nei *Discorsi*, inoltrandosi negli «oscuri, e dubbi sentieri, o più tosto labirinti» dell'infinito.

3. *«Discorrere intorno a gl'infiniti».*

Il nome di Archimede, sempre più spesso invocato tra la fine del Cinquecento e i primi decenni del nuovo secolo a garanzia della scientificità delle ricerche e dei metodi usati nel calcolo di quadrature e baricentri, finiva per nascondere una grande varietà negli argomenti che venivano proposti nel tentativo di divinare il «vero» metodo del Siracusano, quel metodo che fu scoperto solo nel 1906, nella lettera di Archimede a Eratostene celata nel palinsesto del XIII secolo trovato, quasi per caso, dallo storico J.L. Heiberg a Costantinopoli.

Mentre tuttavia Stevin e Valerio avevano mostrato una certa aderenza alle procedure archimedee, Johannes Kepler (1571-1630) (cfr. il cap. VI di questo volume) rivelava nella *Stereometria doliorum* una ben maggiore fantasia matematica e spregiudicatezza di metodi nel maneggiare infiniti e infinitesimi. Quando nel 1615 Kepler pubblicò la *Stereometria* era già matematico di sicura fama: fin dal suo primo scritto, il *Mysterium cosmographicum* (1596), aveva richiamato l'attenzione di Galileo, che mantenne da allora una ininterrotta anche se occasionale corrispondenza con Kepler, e di Tycho Brahe (1546-1601), il celebre astronomo direttore dell'osservatorio di Uraniborg. Qui Brahe aveva raccolto una formidabile quantità di rilevamenti astrònomici, che egli stesso aveva organizzato matematicamente grazie alla sua padronanza dei metodi della trigonometria sferica.

Della sua familiarità colle nuove tematiche dell'astronomia Kepler aveva dato prova nella sua *Astronomia nova* (1609), in cui, valendosi dei dati relativi al moto di Marte, enunciava le prime due «leggi di Kepler», cioè che le orbite dei pianeti sono delle ellissi, di cui il Sole occupa uno dei fuochi, e che il raggio vettore uscente da uno dei fuochi descrive aree uguali in tempi uguali.

Nello stesso anno apparivano i suoi *Ad Vitellionem paralipomena*, commenti all'ottica di Witelo, un matematico polacco del XIII sec. Nei *Paralipomena* Kepler dedicava ampio spazio alla trattazione delle coniche, le curve che si erano rivelate così importanti nell'astronomia e nell'ottica. Egli introduceva il termine ancor oggi in uso di fuoco (*focus*) di una conica e mostrava che le congiungenti un punto qualunque dell'ellisse e dell'iperbole con i fuochi formano angoli uguali con la tangente alla curva nel punto considerato, mentre la parabola ha un solo fuoco al finito, e l'altro è un *focus caecus*, «infinito intervallo a priore remotus». La proprietà sopra descritta per le ellissi e le iperboli si traduce per la parabola nel fatto che un raggio uscente dal fuoco viene «riflesso» parallelamente all'asse della parabola.

Cercando inoltre di caratterizzare più da vicino le curve, Kepler rivelava di avere una prima intuizione del fondamentale concetto di cerchio di curvatura di una curva in un punto, che doveva entrare stabilmente nella geometria molto tempo dopo.

Geniali intuizioni matematiche e brillanti deduzioni nell'astronomia teorica si intrecciavano non raramente in Kepler con i temi dell'esoterismo e del misticismo pitagorico: come nel *Mysterium*, anche nell'*Harmonice mundi* (1619) le considerazioni sui cinque solidi platonici e sulle arcane armonie esistenti nella musica, nella geometria, nell'astrologia e nell'astronomia si intersecano con penetranti indagini sui poligoni regolari e a stella e profondi enunciati sul movimento dei pianeti, come la cosiddetta «terza legge di Kepler» sulla proporzionalità tra il quadrato dei tempi di rivoluzione e i cubi degli assi maggiori delle orbite.

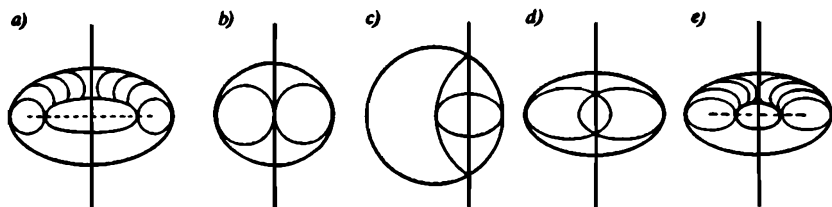
Nelle sue ricerche sui poligoni Kepler si richiamava apertamente ai lavori

di Joost Bürgi (1552-1632), il matematico svizzero conosciuto a Praga alla corte di Rodolfo, dove Bürgi faceva l'orologiaio imperiale. Nella sua *Arithmetica* (1592?) rimasta manoscritta e ritrovata tra le carte di Kepler, Bürgi determinava l'equazione di settimo (o sesto) grado, una delle cui radici dà il rapporto tra raggio di un cerchio e il lato dell'ettagono (regolare) iscritto in esso, mentre altre due danno gli analoghi rapporti per i due ettagoni a stella iscrivibili nello stesso cerchio. Analogamente Bürgi calcolava l'equazione per il pentagono (in cui una radice dà il poligono regolare e l'altra quello a stella) e per l'ennagono. Nella seconda parte dell'*Harmonice mundi* Kepler cercava inoltre di estendere questi risultati alla considerazione di poliedri regolari e a stella.

Nelle pagine introduttive della *Stereometria doliorum* Kepler racconta la singolare vicenda che a Linz lo portò ad occuparsi del problema del calcolo del volume dei solidi. Nella cittadina austriaca l'astronomo aveva preso moglie per la seconda volta e, vista l'eccezionale annata per il vino, aveva deciso di comprare alcune botti per la nuova famiglia. Il vinaio, osservò Kepler con stupore, per determinare la capacità della botte si limitava a misurarne il diametro mediante una canna («virga mensoria») introdotta in essa. Kepler scrive di aver impiegato tre giorni per scoprirne il motivo; una volta redatta, la *Stereometria* doveva attendere ancora più di un anno prima di essere pubblicata nel 1615, quando Kepler, di fronte alla riluttanza degli editori interpellati e gli inutili sforzi di Marco Welser (1588-1614), duumviro di Augusta e buon amico di Kepler e di Galileo, decideva infine di farla stampare a proprie spese a Linz.

Nella prima parte, la *Stereometria archimedea*, Kepler affrontava il calcolo dell'area di superfici piane e curve, a cominciare da quella del cerchio. Come Stifel e Viète ispirandosi alle concezioni sull'infinito che erano state di Nicola da Cusa, «divinus mihi Cusanus», Kepler considerava la circonferenza divisa in infinite parti, tante quante sono i suoi punti («partes habet totidem, quot puncta, puta infinitas») ognuna delle quali era pensata come base di un triangolo infinitesimo con il vertice nel centro del cerchio. Allora, concludeva Kepler, un solo triangolo con altezza pari al raggio e base uguale alla lunghezza della circonferenza consterà di tanti infiniti triangoli infinitesimi quanti ne ha il cerchio, e dunque la sua area sarà uguale a quella del cerchio. Similmente egli ragionava per la superficie sferica, considerando infiniti coni aventi per base un punto della superficie e per vertice il centro della sfera e in maniera analoga determinava l'area della superficie conica e cilindrica.

A questa prima parte Kepler aggiungeva un *Supplementum ad Archimedem*, in cui studiava le figure ottenute ruotando prima un cerchio attorno ad una retta qualunque complanare ad esso e poi una conica attorno ad una

retta parallela ad un asse. Egli otteneva in questo modo il toro («annulus»), l'«annulus strictus» e una quantità di solidi (92 in tutto) che egli chiamava col nome di frutti — mela, mela cotogna, limone, oliva — o nomi tratti dal linguaggio comune, come corna, tiara, turbante, ghirlanda e così via, a seconda delle immagini da essi suggerite.

Per determinarne il volume Kepler immaginava di tagliare il solido con gli infiniti piani passanti per l'asse di rotazione; nel caso dell'anello, ad esempio, le infinite sezioni erano assimilabili a cilindri infinitesimi e il volume si otteneva considerando l'anello come un cilindro richiuso su se stesso, un'applicazione di un classico teorema di Pappo, nota più tardi come «regola di Guldin» (v. oltre). Kepler stesso tuttavia avvertiva sui rischi di errore che si potevano presentare nella generalizzazione delle sue tecniche.

Più che un metodo, ciò che esibisce Kepler è infatti una disinvolta manipolazione di infiniti e infinitesimi sorretta da un genuino e formidabile intuito matematico, un procedere istintivo («quod non possumus apodictice, comprobato dictice») che gli permette di cogliere molti risultati corretti nel campo della (odierna) integrazione definita, ma che talvolta lo conduce fuori strada, come quando afferma di lasciare ad altri la dimostrazione «legitimam» di una data proporzione, che a suo parere si vede («videtur») sussistere, ma che in realtà è inesistente.

Nella seconda parte, la *Stereometria dolii austriaci in specie*, Kepler trattava il problema pratico che aveva originato il suo scritto. I locali fabbricanti di botti, egli scriveva, «solis oculis et speciei pulchritudini ducti», avevano felicemente risolto in pratica il difficile problema di trovare per una botte la forma che assicurava la massima capacità col minimo utilizzo di legname. «Quis neget, naturam insictu solo, sine etiam ratiocinatione docere geometriam?» esclamava ammirato Kepler.

Per la soluzione matematica di quel problema non basta però l'istinto

naturale, necessitano anzi profonde conoscenze geometriche e Kepler si inoltra nel difficile campo dei problemi di massimo e minimo, allora praticamente inesplorato. Tra i risultati più interessanti cui egli perviene c'è l'osservazione che in presenza di un massimo (o di un minimo) le variazioni sono insensibili («circum maximum vero utrimque circumstantes decrementa habent initio insensibilia»).

Forse qui Kepler si ispirava alle speculazioni sugli infinitesimi e gli infiniti di Cusano o di Oresme, o forse aveva in mente la controversa questione euclidea degli angoli di contatto (che cosa pensare dell'ampiezza degli angoli formati da curve, cerchi per esempio, con una stessa tangente in comune in un punto?).

Una questione ancora irrisolta, anche dopo le recenti prese di posizione di Cardano e Clavio, e che percorrerà tutto il secolo, fino a Leibniz e Newton. Certo è che l'idea kepleriana si rivelerà di grande importanza nelle successive ricerche sui massimi e minimi, che vedremo inaugurate da Fermat (cfr. il cap. IX di questo volume).

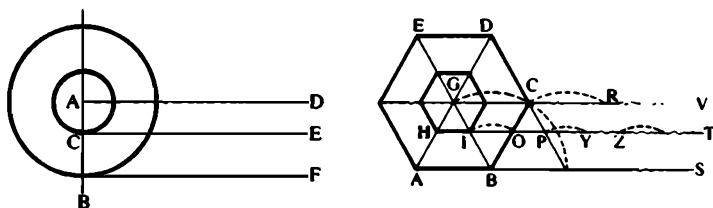
La *Stereometria doliorum* rappresentò una fonte di ispirazione e un termine di confronto per i matematici dell'epoca, a cominciare da Galileo. Questi aveva infatti fin dal 1610 progettato diversi «opuscoli di soggetti naturali», tra cui il *De compositione continui*, un'indagine sulla natura del continuo che tuttavia il matematico pisano non scriverà mai.

Quella del continuo è comunque questione di grande attualità all'epoca, che si affaccia continuamente nelle polemiche antiaristoteliche che agitano la fisica della fine del '500 e dell'inizio del '600 e si coniuga con la ripresa dei temi dell'atomismo in matematica e l'affermazione dell'esistenza del vuoto e della realtà «naturale» dell'infinito attuale.

«Aristotele ritiene senza provarlo e anche senza fornirne alcuna spiegazione che le infinite parti del *continuum* non siano in atto, ma solo in potenza», aveva scritto ad esempio Benedetti nelle *Diversarum speculationum*. «Ma su ciò non intendiamo affatto dargli ragione, giacché se il *continuum* tutto intero e realmente esistente è in atto, tutte le sue parti saranno in atto, perché è stupido credere che le cose che sono in atto si compongano di quelle che esistono solo in potenza» (in Koyré [1966], 1976, 54) aveva ancora aggiunto Benedetti; dunque si danno in natura molteplicità infinite in atto e potenziali, giacché «multitudo non minus infinita quam

finita intelligi potest», sebbene non la possiamo cogliere coi sensi, come avviene quando si considera un segmento e poi si passa alla sua metà, alla quarta parte, all'ottava, «alla millesima e a qualunque si voglia».

Parole che troveranno un'eco autorevole nei *Discorsi* galileiani, quando, nella prima giornata, Galileo esprimerà per bocca di Salviati, anziché nel progettato opuscolo, le sue opinioni sul continuo, gli infiniti e gl'indivisibili non quanti.

«Discorrere intorno a gl'infiniti» è cosa che ad ogni passo porta con sé il rischio d'imbattersi in «maraviglie» e paradossi, e Salviati comincia subito a sbalordire i suoi interlocutori con un argomento paradossale. Consideriamo per esempio due esagoni regolari concentrici, e immaginiamoli «rivolgersi sopra la linea AS» (v. figura).

«Finita un'intera conversione» il poligono maggiore avrà percorso su AS un segmento pari al suo perimetro, il minore un segmento quasi uguale HT (tolte le corde degli archi IO, PY ecc.); che cosa accade quando si pensa a un «gran poligono di mille lati» o addirittura a un cerchio, meglio a due cerchi concentrici? Se si ripete il ragionamento, le due linee BF e CE saranno uguali. «Hor come dunque può senza salti scorrere il cerchio minore una linea tanto maggiore della sua circonferenza?» domanda Salviati.

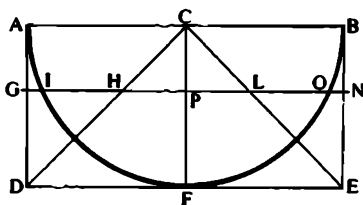
Si tratta di un «negozio» «veramente molto intrigato», ma altrettanto intrigata è la spiegazione che ne dà Salviati-Galileo, che ricorre all'argomento suggerito dall'esempio degli esagoni per dire che se avessimo un poligono di centomila lati, la linea percorsa dal poligono minore sarebbe uguale a quella del poligono maggiore «ma con l'interposizione di centomila spazii vacui trasposti». Nel caso dei due cerchi, «si come i lati non son quanti, ma bene infiniti», così «gl'interposti vacui non son quanti ma infiniti». Per dar senso a questa sua affermazione, Galileo afferma che sia le semplici linee, sia le superfici e i corpi solidi vanno considerati «composti di infiniti atomi non quanti»; in questo modo «potremo concepire tali componenti distratti in spazio immenso senza l'interposizione di spazi quanti vacui, ma solamente di

vacui infiniti non quanti»: ecco come si può dar conto del paradosso della linea percorsa dalle due circonferenze.

È sufficiente che Simplicio evochi «quei vacui disseminati di certo filosofo antico» perché Galileo si affretti — con le parole di Sagredo e dello stesso Simplicio — a ribadire la propria ortodossia cattolica, «e religiosa e pia» (ma siamo nel 1639, dopo la condanna dei *Dialoghi* da parte del Sant'Uffizio).

Al di là delle questioni dottrinali, resta il fatto che gli argomenti di Galileo «paiono scogli assai duri da passarsi», tanto che Salviati ammonisce i suoi interlocutori (e il lettore): «ricordiamoci che siamo tra gl'infiniti, e gl'indivisibili, quelli incomprensibili dal nostro intelletto finito per la lor grandezza, e questi per la lor piccolezza» (Galileo 1639, 27). Certo comunque la spiegazione tentata da Galileo del paradosso aristotelico dei due cerchi (o della «ruota») lascia la questione aperta e, contestando l'argomento galileiano, Descartes non mancherà di notare che, sebbene Galileo dichiari l'infinito «incomprensibile per il nostro intelletto finito», nondimeno «non tralascia di parlarne come se lo comprendesse».

Il fascino dell'infinito per Galileo è infatti tale che «l'humano discorso non vuol rimanersi dall'aggirarsegli intorno» ed ecco ancora Salviati produrre un nuovo argomento paradossale, una «fantasticheria» suggeritagli dalla lettura di Valerio: «come si possa mai capire, che un sol punto sia uguale a una linea»?

Galileo riprende qui la dimostrazione data da Valerio nel *De centro gravitatis solidorum* che la semisfera AFB è doppia del cono DCE e equivalente ai due terzi del cilindro ABED.

Supponiamo di togliere dal cilindro l'emisfera e di considerare, con Galileo, la «scodella» restante e il cono DCE. Si può dimostrare in termini di geometria elementare che se si taglia la figura con un piano qualunque GN parallelo alla base AB, la sezione del cono (il cerchio di diametro HL) e il «nastro» ottenuti avranno aree uguali, come pure saranno uguali il cono CHL e la parte superiore della scodella. Dunque, «alzando e alzando» il piano secante, le sezioni si ridurranno rispettivamente ad un punto (il

vertice C del cono) e ad una circonferenza (l'«orlo supremo della scodella»). «Or mentre che nella diminuzione dei due solidi si va fino all'ultimo mantenendo sempre tra essi la egualità — conclude Salviati — ben par conveniente il dire, che gli altissimi, e ultimi termini di tali menomazioni restino tra loro eguali, e non l'uno infinitamente maggior dell'altro» (Galileo 1639, 29). Eccoci dunque pervenuti al paradosso, «che la circonferenza di un cerchio immenso possa chiamarsi uguale a un sol punto».

Una «specolazione tanto gentile e peregrina» che affascina Galileo e fa dire a Sagredo che, pur avendo mai argomenti per controbatterla, gli «parrebbe un mezzo sacrilegio lacerar si bella struttura calpestandola con qualche pedantesco affronto». Altrettanto perentorio è il giudizio su un'obiezione che si presenta spontanea quando si considera il continuo composto di infiniti indivisibili: dati due segmenti disuguali, dovremo dire che «l'infinità dei punti della linea maggiore eccederà l'infinità dei punti della minore»?, che siamo in presenza di infiniti uno più grande dell'altro?

Ancora una volta Galileo ribatte che queste difficoltà derivano dalla nostra tendenza ad attribuire agli infiniti qualità che sono proprie delle cose finite, ed illustra il suo argomento con il celebre esempio dei numeri e dei loro quadrati: se si considerano i numeri interi 1, 2, 3,... e i quadrati perfetti 4, 9, 16,... non c'è dubbio che non tutti i numeri sono quadrati perfetti e d'altra parte questi ultimi sono tanti quanti le loro radici:

$$\begin{array}{ccccc} 1 & 2 & 3 & 4 & \ldots n \ldots \\ \updownarrow & \updownarrow & \updownarrow & \updownarrow & \updownarrow \\ 1 & 4 & 9 & 16 & \ldots n^2 \ldots \end{array}$$

cioè infiniti le une e gli altri, anche se «da principio dicemmo tutti i numeri esser assai di più» e se il numero dei quadrati diminuisce sempre più «quanto a maggior numeri si trapassa».

La conclusione di Galileo è perentoria: «gli attributi di eguale, maggiore e minore non haver luogo ne gl'infiniti, ma solo nelle quantità terminate». Bisognerà aspettare la fine dell'Ottocento perché il concetto di corrispondenza biunivoca, qui intravistó da Galileo, venga posto da Georg Cantor alla base della moderna teoria dei numeri transfiniti (vol. II, cap. XXXVIII).

Galileo crede di superare l'*impasse* introducendo un «terzo medio termine» tra il finito e l'infinito, che è «il rispondere ad ogni segnato numero»: a ciò soddisfano le «parti quante» del continuo, gli intervalli in cui per esempio possiamo dividere un segmento, i cui punti sono comunque infiniti, «chiamategli poi in atto o in potenza» come più piace ai «signori Filosofi». E pur concedendo ai Peripatetici che il continuo è divisibile in parti sempre divisibili, Galileo obietta «niuna delle tali loro divisioni esser

l'ultima» ma «bene l'ultima e altissima esser quella, che lo risolve in infiniti indivisibili». A ciò non si perviene certo dividendo successivamente il continuo, ma concependo «tutta la infinità in un tratto solo».

All'atomismo fisico che ispira queste pagine di Galileo sulla delicata e complessa questione del continuo — da lui concepito composto da infiniti «atomi assolutamente indivisibili» — si accompagna una contemporanea ripresa di temi pitagorici: «se numero alcuno può dirsi infinito, questo sia l'unità» conclude infatti Galileo. Essa contiene in sé infiniti quadrati, e cubi e quante «dignità» si vogliano e possiede con ciò i «necessari requisiti del numero infinito»: una conclusione cui non dovevano essere estranee eretiche suggestioni bruniane sugli «infiniti mondi et uno».

4. *«L'oceano della infinità degli indivisibili».*

Le idee sulla composizione del continuo, maturate da Galilei in lunghi anni di riflessioni e infine presentate nei *Discorsi*, si erano anche intrecciate con le «specolationi» e i dubbi sull'infinito e gli indivisibili, che nelle lettere al matematico toscano avanzava il padre Bonaventura Cavalieri (1598-1647).

Entrato nell'Ordine dei Gesuati di S. Gerolamo ancora sedicenne, Cavalieri era stato ben presto trasferito nel convento di Pisa. Qui aveva seguito le lezioni di matematica del padre Benedetto Castelli (1577-1644), uno dei primi allievi di Galilei, e forse proprio attraverso Castelli, Cavalieri conobbe il «Primo Matematico del Granduca».

Di fatto è a Galilei che Cavalieri si rivolge come al proprio maestro, comunicandogli i primi risultati delle sue ricerche geometriche, i progressi compiuti e i dubbi che via via si presentano, in un fitto carteggio che dura più di vent'anni. «Vado dimostrando alcune propositioni d'Archimede diversamente da lui, et in particolare la quadratura della parabola, divers'ancora da quello di V.S.» annuncia Cavalieri al maestro nel 1621. Si affacciano qui le prime idee del metodo degli indivisibili che troveranno forma compiuta nella *Geometria indivisibilibus continuorum nova quadam ratione promota*, un'opera che Cavalieri pubblicherà solo nel 1635 dopo esitazioni, riscritture, impedimenti di varia natura e ritardi nella stampa. Continua la lettera di Cavalieri a Galilei: supponiamo di aver tirata in una figura piana una retta qualunque e poi tutte le parallele possibili, «chiamo queste linee così tirate tutte le linee di quella figura». Analogamente per un solido si definiscono «tutti i piani di quel solido» (in Cavalieri 1966, 727).

Ora il problema che immediatamente si presenta a Cavalieri e su cui interroga Galilei è «se tutte le linee d'un piano a tutte le linee d'un altro piano habbino proportione», giacché «pare che tutte le linee d'una data

figura sieno infinite, e però fuor della diffinitione delle grandezze che hano proportione» e d'altra parte ingrandendo una figura dovrebbe aumentare il numero delle linee, quindi «pare che non sieno fuori di quella diffinitione». Come si vede, fin dai primi passi Cavalieri s'imbatte nella delicata questione del confronto tra infiniti.

Nella primavera seguente Cavalieri aveva comunque superato le proprie esitazioni: scrive a Galileo che gli pare «facile da dimostrare» la sussistenza della proporzione in discorso e insieme gli manda «alcune cosette di geometria» che gli sono passate «per la fantasia». Si trattava, in sostanza, del contenuto essenziale del II libro della sua *Geometria*, su cui chiedeva un giudizio.

I due tuttavia andavano maturando idee radicalmente diverse sul rapporto di infiniti, gli indivisibili e la composizione del continuo. La risposta di Galileo si lascia inutilmente attendere. Solo alla fine di quell'anno Cavalieri viene infatti a sapere, tramite il padre Castelli, che Galileo «mi deve scrivere al longo per le difficoltà che mi dice havere circa quel trattato, che il scrivermi pocco sarebbe non scrivermi» (in Cavalieri 1966, 734).

A Galileo comunque Cavalieri continua a inviare, sollecitando un'opinione, parti successive della *Geometria* che va mettendo «in sesto» con un lavoro «alla gagliarda». Informandolo dei propri progressi negli studi, nell'aprile del 1627 il giovane gesuato comunica al maestro che per completare l'opera intrapresa gli resta soltanto da mettere a punto il primo libro «delle propositioni lemmatiche, che già stano in confuso». Un lavoro che subisce una lunga pausa quando, nel 1629, Cavalieri riesce a ottenere una «lettura» allo Studio di Bologna, grazie all'appoggio di Galileo e ai buoni uffici presso il Senato cittadino di Cesare Marsili, amico del matematico pisano e «intendente» di cose scientifiche. Nonostante le divergenze in geometria, Galileo mantiene infatti un'alta stima del suo giovane allievo, che nei *Discorsi* chiamerà «uno dei principali matematici dell'età nostra».

Per la riconferma della «lettura», Cavalieri si vede costretto ad accantonare momentaneamente le ricerche sugli indivisibili — cose «così ristrette che restano quasi incomunicabili» — per dedicarsi ad argomenti di maggior «spaccio». Escono così nel 1632 il *Directorium generale uranimetricum*, un'opera in tre parti sui logaritmi e la trigonometria piana e sferica e *Lo specchio ustorio*, un volumetto in cui Cavalieri, ispirandosi al racconto sugli apparecchi inventati da Archimede per incendiare le navi romane durante l'assedio di Siracusa, tratta ampiamente delle sezioni coniche, dimostra alcuni teoremi soltanto enunciati da Kepler e afferma, come già Guidobaldo e come farà Galileo basandosi sulla legge di caduta dei gravi, che la traiettoria di un proietto è una parabola.

Tre anni più tardi usciva finalmente la *Geometria*, arricchita di un settimo

libro, nel quale, come Cavalieri scriveva ancora a Galilei, «dimostro le medesime cose per altra via, esente da tale infinità» che aveva suscitato le difficoltà del matematico pisano. Ciò fornisce a Cavalieri anche l'occasione per controbattere, nella stessa lettera, agli esempi paradossali della «scodella» e della «ruota», che Galileo gli doveva aver comunicato e che poi, come abbiamo visto, inserirà nei *Discorsi*.

L'argomento di Cavalieri, nel primo caso, è molto semplice: quando si considerano le sezioni, si ha a che fare con indivisibili piani «e di questi rimangono sempre parti eguali, detrahendone parti eguali dal cono e dalla scodella». Quando poi si arriva all'ultima «esinanitione» non si hanno più piani e si può dire che queste ultime «esinanitioni» sono uguali solo nel senso che siamo «noi arrivati al nullo piano tanto nel cono quanto nella scodella, non havendoci che far niente che in uno resti un punto e nell'altro una linea, come che tanto sia niun piano la linea come il ponto» (Cavalieri 1966, 755). Un argomento che certo non doveva convincere Galilei, che, pur non nominando Cavalieri, riterrà anzi una simile obiezione un «pedantesco affronto».

Per «liberarsi» del paradosso delle due circonferenze concentriche, Cavalieri ricorre invece alla distinzione, che farà nella *Geometria*, tra punti (o rispettivamente rette o piani) di *retto transito* o di *obliquo transito*: «Se per tangenti opposte di una qualsivoglia figura piana data si conducono due piani mutuamente paralleli, perpendicolari, o inclinati rispetto al piano della figura data, indefinitamente prolungati dall'una e dall'altra parte, dei quali l'uno si sia fatto muovere verso il rimanente, ad esso sempre parallelo, fino a sovrapporsi ad esso — le singole linee rette, che durante il moto sono intersezioni del piano mosso, e della figura data, prese insieme si chiamino: *tutte le linee* di tale figura, presa come riferimento una di esse; e ciò quando i piani siano perpendicolari alla figura data» (Cavalieri [1635], 1966, 191). Si ha un transito obliquo quando invece i piani sono inclinati.

Comunque sia, il paradosso della ruota non tocca il suo metodo, dice Cavalieri, «poiché assolutamente io non mi dichiaro di componere il continuo d'indivisibili, ma solo mostro che i continui hanno la proportione degli aggregati di questi indivisibili».

Nel II libro della *Geometria* Cavalieri aveva infatti deliberatamente lasciata aperta la questione della natura del continuo: geometra puro, poco sensibile alle dispute dottrinali e filosofiche, Cavalieri non ardisce avventurarsi su un terreno a lui poco congeniale né osa d'altra parte, come Galilei, risolvere il continuo «in un tratto solo». Al suo scopo basta poter dire che «tanto se il continuo è composto da indivisibili, quanto se non lo è, gli aggregati degli indivisibili sono mutuamente confrontabili, ed hanno rapporto». Il che gli permette di stabilire, sempre nel libro II, il «massimo

fondamento» della sua nuova geometria: «per trovare quale rapporto abbiano tra di loro due figure piane o solide, sarà per noi sufficiente trovare, nelle figure piane, quale rapporto abbiano tra di loro tutte le linee di esse e, nelle figure solide, tutti i piani di esse, presi rispetto a un riferimento qualunque» (*Ibid.*, 211).

A questa idea era pervenuto, come egli stesso racconta nelle pagine introduttive della *Geometria*, meditando sulla generazione dei solidi mediante rivoluzione intorno a un asse: confrontando «il rapporto delle figure piane generatrici con quello dei solidi generati, mi stupivo in verità moltissimo del fatto che le figure generate tralignassero a tal punto dalla condizione dei propri genitori» (*Ibid.*, 46). Infatti, dalla rotazione di un rettangolo intorno a un lato si ottiene un cilindro che è *triplo* del cono ottenuto ruotando il triangolo rettangolo *metà* del rettangolo di partenza. Analogamente accade per moltissime altre figure; anziché considerare piani intersecantisi lungo l'asse e trebbiare «inutile paglia», occorreva considerare piani *paralleli* fra loro: è questa «l'opinione» che porta Cavalieri alla proposizione sopra enunciata, nota come «principio di Cavalieri» o «primo metodo degli indivisibili» come la chiamò lo stesso geometra.

Questo metodo viene sistematicamente applicato da Cavalieri nei primi sei libri della *Geometria*: tra i risultati più rilevanti, figura il cosiddetto «teorema di Cavalieri-Lagrange» o «del valor medio» o «degli incrementi finiti», che è forse il teorema più importante del moderno calcolo differenziale. In Cavalieri è assente ogni riferimento analitico ed egli lo presenta naturalmente in forma geometrica, sotto la veste di *Problema I* che apre il I libro della *Geomètria*: «Trovare un vertice di una qualsivoglia figura piana, o solida, data, rispetto a una linea retta, nel caso di una figura piana, rispetto ad un dato piano invece, nel caso di una [figura] solida» (*Ibid.*, 81).

Nonostante la quantità di risultati che Cavalieri riesce a ottenere (ivi compreso il calcolo del volume di numerosi solidi della *Stereometria* kepleriana) e sebbene egli ritenga i fondamenti del suo metodo «così saldi e incrollabili» da non vacillare minimamente anche se «percossi dai colpi di sommi ingegni come da colpi di arieti», Cavalieri, nel VII libro, abbandona la via seguita fino ad allora per introdurre un nuovo metodo e aggirare con ciò le obiezioni che potrebbero venirgli dai filosofi circa la composizione dèl continuo, gl'infiniti, gl'indivisibili o «perché ho osato collocare come fondamento solidissimo della Geometria un infinito maggiore dell'oceano». Cavalieri parla di «filosofi», ma certo non poteva non avere in mente le difficoltà che ancora gli aveva manifestato Galileo alla lettura dei primi libri.

Cavalieri ridimostra così i risultati essenziali dei primi sei libri con un «secondo metodo degli indivisibili», in cui evita la considerazione dell'aggre-

gato di «tutte le linee» (o «tutti i piani») di una figura, per passare ad una concezione per così dire distributiva degli indivisibili, in cui si confrontano ad uno ad uno gli indivisibili di due date figure. La *Proposizione I* del VII libro afferma infatti: «Figure piane quali si vogliano collocate tra le medesime parallele, nelle quali — condotte linee rette qualunque equidistanti alle parallele in questione — le porzioni intercette di una qualsivoglia di dette rette sono uguali, sono del pari uguali tra loro» (*Ibid.*, 654). Un enunciato analogo vale per il caso di solidi, ed è sotto questa forma che oggi è comunemente noto il «principio di Cavalieri».

Alla pubblicazione della *Geometria* (un'opera di «poco spaccio» come lamenta lo stesso autore, e che non suscita nei primi anni una vasta eco) Cavalieri fece seguire un libretto «di prattiche», la *Centuria di varii problemi*, nel quale mostrava come utilmente usare i logaritmi nel risolvere problemi di astronomia, trigonometria e aritmetica pratica e concludeva con «questa bella cosa», che ancora una volta il gesuato aveva anticipato per lettera a Galilei: in termini moderni, il calcolo dell'integrale definito

$$\int_0^a x^m dx = a^{m+1}/m+1 \quad (m \neq -1)$$

un risultato che all'insaputa di Cavalieri e per altra via era noto anche ai matematici francesi.

La *nova ratio*, il metodo degli indivisibili proposto da Cavalieri, che aveva trovato in Galileo un interlocutore attento anche se sostanzialmente poco convinto, doveva rivelarsi pochi anni più tardi strumento di formidabile fecondità nelle mani di un altro geniale allievo di padre Castelli e Galileo, il faentino Evangelista Torricelli (1608-1647).

La figura di Torricelli attraversa come una meteora la matematica dell'epoca: si annuncia nel 1632 come segretario del padre Castelli a Roma, con una lettera a Galileo in cui gli comunica di aver studiato «minutissimamente e continuamente sino al presente giorno il libro di V.S. [*I Dialoghi*] con quel gusto che Ella si puol imaginare» e al tempo stesso afferma di «avere bene praticata tutta la geometria» classica e le opere più recenti di Tycho Brahe e di Kepler e infine si dichiara «di professione e di setta Galileista» (in Torricelli 1975, 10-11).

Dopo un lungo periodo trascorso a Fabriano come segretario di Ciampoli (il monsignore «galileista» cui Cavalieri aveva dedicato la *Geometria* ed era caduto in disgrazia dopo la condanna dei *Dialoghi*) Torricelli è ad Arcetri nel 1641 al fianco di Galileo. Alla morte dello scienziato viene nominato «Matematico e Filosofo» del Granduca e succede a Galileo anche nella carica di «lettore» allo Studio fiorentino.

Ha inizio così per Torricelli la breve stagione dei successi e dei riconoscimenti scientifici, interrotta nel 1647 dalla improvvisa morte: un periodo

di intense ricerche di ottica, fisica galileiana, esperienze sul vuoto e il moto dei proietti, brillanti scoperte geometriche, molte delle quali sparse «alla spezzata» in fogli di appunti nelle «borse e cartucce» lasciate alla sua morte.

Geometra formatosi praticando i classici, come egli scrive, oltre che i libri di Galileo, Torricelli non aveva fino al 1641 alcuna familiarità con gli indivisibili e, a proposito di alcuni problemi postigli da Cavalieri, confida a Raffaello Magiotti, erudito e uomo di sicure conoscenze matematiche: «Quanto al quesito di F. Bonaventura, io veramente lo giudico cosa inesplicabile da qualsivoglia ingegno fuor che dal suo proprio». Del resto, continua Torricelli, «queste sono cose, che per lo più si trovano incidentalmente, e F. Bonaventura credo che le scioglierà con i suoi principii de gl'infiniti; cose non approvate da tutti». Perplessità che gli nascono anche dalla propria dichiarata incompetenza sull'argomento «poi che ogn'uno non è obbligato ad aver fatto il suo studio particolare sopra quella tal materia».

Forse perché stimolato da Cavalieri, forse per le conversazioni con Galileo, Torricelli muta ben presto opinione sul metodo degli indivisibili. Se ne appropria in brevissimo tempo, portandovi un contributo fortemente originale con la considerazione degli indivisibili curvi. Per mezzo di questi riesce a trovare il volume generato dalla rotazione di un'iperbole equilatera intorno ad un asintoto, «il solido iperbolico acutissimo» come lo chiamerà Torricelli. La notizia riempie d'ammirazione Cavalieri: «Mi giunge la lettera di V.S. M. Rev.do in tempo che io stavo nel letto con la febbre, e gotta... ho però goduto al dispetto del male de' saporitissimi frutti del suo ingegno, essendomi riuscito infinitamente ammirabile quel solido iperbolico infinitamente lungo, ed uguale a un corpo quanto a tutte e tre le dimensioni finito, ed avendolo io comunicato ad alcuni miei scolari filosofi, hanno confessato parergli veramente meraviglioso, e stravagante, che ciò possa essere» (in Torricelli 1975, 14).

La scoperta di Torricelli è veramente stupefacente agli occhi di Cavalieri che ancora gli scrive: «non so come abbi pescato nell'infinita profondità di quel solido così facilmente la sua dimensione, poiché veramente a me pare infininitamente lungo, parendomi infinitamente lungo lo spazio piano, che lo genera».

Torricelli pubblica la sua scoperta nel 1644, nell'*Opera geometrica*, un volume che raccoglie i suoi studi geometrici insieme a ricerche sul moto dei gravi e dei proietti. I primi due libri sono dedicati allo studio dei solidi sia iscritti sia circoscritti alla sfera generati dalla rotazione di poligoni regolari (i *solidi sferali* nella terminologia di Torricelli), che rappresentano un'estensione delle classiche ricerche di Archimede. Dopo due libri dedicati al moto dei corpi, Torricelli affronta il problema della quadratura della parabola, argomento «trito» quant'altri mai, com'egli stesso riconosce. Ma assolutamente nuovi sono i modi (ben 21!) con cui egli riesce nello scopo e, se non

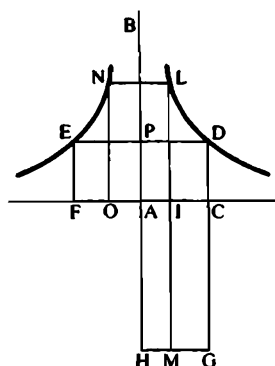
nuove, certo interessanti sono le sue considerazioni sui «principi dell'arte», come la esplicita difesa dei metodi meccanici nelle ricerche geometriche: «io sarei favorevole a che vengano impiegate delle considerazioni di tipo meccanico nelle definizioni delle figure geometriche», cosa che solleverebbe le proteste solo di coloro «che non accettano l'opera meccanica di Archimede, secondo la concezione dello stesso autore». È ancora la *vexata quaestio* del vero metodo di Archimede che si affaccia nelle parole di Torricelli e che, nella stessa *Opera geometrica*, lo porterà a scrivere a proposito degli indivisibili: «Che questa geometria degli indivisibili sia una invenzione del tutto nuova, non oserei affermarlo. Crederei piuttosto che gli antichi Geometri si siano serviti di questo metodo nell'invenzione dei Teoremi più difficili, benché nelle dimostrazioni abbiano preferito un'altra via, sia per occultare il segreto dell'arte, sia per non offrire agli invidi detrattori alcuna occasione per contraddirli» (Torricelli [1644], 1975, 19).

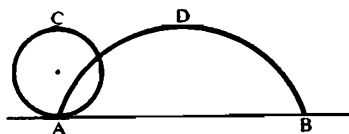
Se dunque Torricelli assimila e fa proprio in maniera geniale il *metodo* degli indivisibili, «il quale è un vero modo scientifico di dimostrare, diretto, e per così dire naturale», mostra al contrario scarsa sensibilità per la *teoria* costruita da Cavalieri, complessa, a volte involuta, continuamente percorsa e animata da esigenze di sistematicità e generalità delle proposizioni enunciate e dimostrate. Così, apparentemente senza risposta resta la richiesta di Cavalieri a Torricelli di «una proposizione generale, che dimostrasse l'eggualità di due figure, piane e solide, quando i loro indivisibili curvi, e diversi sono eguali».

A Torricelli basta poter scoprire e dimostrare teoremi col metodo degli indivisibili, che «non è da trascurare, soprattutto perché si rivela della massima importanza nella trattazione dei problemi più difficili». Tuttavia, «per soddisfare anche il lettore poco amico degli indivisibili», ripete le dimostrazioni alla maniera degli Antichi, un modo «il quale è bensì più lungo, ma non per questo, secondo me, più sicuro».

Non c'è dubbio comunque che «la dottrina degli indivisibili [sia] la vena e la miniera inesausta delle speculazioni belle e delle dimostrazioni a priori» scrive Torricelli a Cavalieri nel 1643; e «muove a compassione la vecchia Geometria, la quale non conoscendo oppure non ammettendo gli indivisibili, nello studio della misura dei solidi scoprì così poche verità, che una penosa povertà di idee è perdurata fino all'età nostra» (*Ibid.*, 423).

Nel calcolo del volume del suo solido iperbolico «acutissimo» Torricelli considera gli indivisibili curvi, «che nelle figure piane sono le periferie dei circoli, e nelle figure solide, sono superfici sferiche, cilindriche e coniche». Mediante essi, Torricelli dimostra che «il solido acuto iperbolico infinitamente lungo, tagliato con un piano perpendicolare all'asse, insieme con il cilindro della sua base, è uguale ad un cilindro retto, la cui base sia il lato

verso, ovvero l'asse della iperbola, e la cui altezza sia eguale al semidiametro della base del solido acuto» (*Ibid.*, 444).

Il che, in termini moderni, significa un primo esempio di calcolo di un integrale improprio e a ragione Torricelli affermava che si tratta di «un problema che, a degli aspiranti geometri, sembrerebbe non solo difficile, ma addirittura impossibile».

Quando l'*Opera geometrica* era già sotto i torchi, Torricelli ebbe notizia che lo stesso risultato era stato ottenuto da Roberval, così come, ancora dai matematici francesi, erano intensamente studiate le proprietà della cicloide, la curva generata da un punto di una circonferenza che ruota senza strisciare lungo una retta, che Torricelli tratta in appendice del suo libro, e di cui dimostra che l'area sottesa dall'arco ADB è tre volte quella del cerchio AC.

Tramite il padre Mersenne, che aveva conosciuto nel corso dei suoi viaggi in Italia nel 1640 e 1647, Torricelli era entrato in contatto con i matematici d'oltralpe e molte delle questioni che egli intendeva raccogliere nella progettata opera *De lineis novis* (come lo studio delle infinite iperboli della

forma $x^m y^n = k$ o lo studio delle spirali logaritmiche) si intrecciano con quelle affrontate da Fermat, Roberval e Descartes.

Manoscritti, i risultati di Torricelli circolarono ampiamente tra i matematici italiani. Ne vennero a conoscenza l'aretino Antonio Nardi (?-1650?), amico di Torricelli fin dal periodo romano, che alle scoperte dell'amico si riferisce in molte delle «vedute» che compongono le sue *Scene* rimaste manoscritte; Michelangelo Ricci (1619-1682), anch'egli allievo del padre Castelli e futuro autore di un'apprezzata *Exercitatio geometrica* (1666); così come Cavalieri e il suo allievo Stefano degli Angeli (1623-1697), lettore di matematica a Padova che ebbe tra i suoi studenti Isaac Barrow (1630-1677) e James Gregory (1638-1675), due tra i più validi esponenti della matematica inglese prima di Newton.

Nelle carte lasciate da Torricelli si trovano sparsi in più frammenti, intercalati a brani di lettere o ad altri calcoli di difficile decifrazione, profondi e geniali risultati che annunciano in casi particolari concetti introdotti con tutta la generalità dai fondatori del calcolo infinitesimale. Tra questi, i suoi studi sulle tangenti e la quadratura delle infinite parabole e delle infinite spirali, oltre che la regola per la determinazione del baricentro di una figura qualunque (purché dotata di asse), un «teorema universale» cui Torricelli era stato condotto, stimolatovi da Cavalieri, dallo studio della *Centrobaryca*, l'opera in 4 volumi (1635-1641) del gesuita svizzero Paul Guldin (1577-1643).

Guldin vi aveva enunciato la famosa «regola», secondo cui il volume del solido generato dalla rotazione di una figura piana attorno a una retta è dato dal prodotto dell'area della figura per la lunghezza della circonferenza descritta dal suo baricentro: la «massima conclusione di tutte quante io habbia mai sentito fino a questo giorno» scriveva Torricelli. Ma «un teorema poi così grande (che è verissimo) il buon Padre non lo sa dimostrare» era il suo pungente commento alle insufficienze e ingenuità della dimostrazione datane dal gesuita. Insufficienze che si accompagnavano talvolta a veri e propri errori («ha inciampato enormemente circa i centri delle superficie» osserverà ancora Torricelli). «Insomma io gli pronunzio — concludeva perentorio il matematico faentino in una lettera a Cavalieri del 1646 — che il padre Guldino, per quanto si può argomentar da questo libro è stato un bue» (in Cavalieri 1966, 793-794).

Nel II libro della *Centrobaryca* Guldin si era lanciato in una violenta accusa di plagio a Cavalieri (pur ammettendo di aver dato solo un'occhiata alla sua *Geometria* «come attraverso la grata di una finestrella»), imputandogli di aver preso «l'appiglio e l'occasione per tirar fuori il suo metodo degli indivisibili» dalla *Stereometria* di Kepler e dal *Tractatus de recti et curvi proportione* (1630), l'operetta postuma del gesuita svizzero Bartolomeo

Souvey (1577-1629). Un metodo comunque che, a parere di Guldin, vale «moltissimo per scoprire teoremi e problemi geometrici» ma che «in alcun modo» deve «essere adibito alle dimostrazioni»: è questa, come ha osservato Lombardo Radice, «la protesta di un fedele e onesto seguace delle dottrine filosofiche e geometriche tradizionali: un Simplicio della geometria» (in Cavalieri 1966, 744).

Quella di Guldin fu comunque solo la più nota delle voci che si levarono contro la teoria degli indivisibili, per rivendicare legittimità e dignità geometrica ai soli procedimenti degli Antichi.

Mentre Torricelli, nel *De indivisibilium doctrina perperam usurpata*, raccoglieva una serie di esempi per mostrare come ragionassero male i critici degli indivisibili, Cavalieri ormai cronicamente tormentato dalla gotta elaborava a fatica la risposta alle accuse di Guldin. Pensata prima sotto forma di dialogo sull'esempio galileiano, la difesa del gesuato doveva infine uscire nella *Tertia* delle *Exercitationes geometricae sex*, apparse a Bologna nel 1647, pochi mesi prima della morte di Cavalieri.

La quasi contemporanea e improvvisa morte di Torricelli segnava la fine della grande stagione della geometria italiana apertasi con il Rinascimento e poi largamente influenzata dalla figura di Galileo. Cavalieri e Torricelli ne furono forse gli interpreti più originali e autorevoli. Essi non furono (come li ha definiti Loria) «gli ultimi degli Antichi», ma piuttosto dei protagonisti consapevoli delle più avanzate ricerche della matematica del loro tempo.

BIBLIOGRAFIA

Testi

B. CAVALIERI, *Geometria degli indivisibili* (1635), a cura di L. Lombardo Radice, Torino, UTET, 1966.

ID., *Exercitationes geometricae sex* (1647), Roma, Cremonese, 1980.

ID., *Opere inedite*, a cura di S. Giuntini, E. Giusti, E. Ulivi, in «Bollettino di storia delle scienze matematiche», anno V, n° 1 & 2, 1985.

GALILEO GALILEI, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti la meccanica e i movimenti locali*, Leida, Elzevirii, 1639, (rist. Bruxelles, Culture et civilisation, 1966).

E. TORRICELLI, *Opere scelte*, a cura di L. Belloni, Torino, UTET, 1975.

L. VALERIO, *De centro gravitatis solidorum libri tres*, Bologna, 1604.

Studi

K. ANDERSEN, *Cavalieri's Method of Indivisibles*, in «Archive for History of Exact Sciences», vol. 31, 1985, pp. 291-367.
B. BILINSKI, *Prolegomena alle Vite dei Matematici di Bernardino Baldi (1587-1596)*, Accademia Polacca delle Scienze, Biblioteca e Centro Studi a Roma, Conferenze e Studi, vol. 71.
C. BOYER, *The History of the Calculus and Its Conceptual Development*, New York, Dover, 1959.
M. CANTOR, *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*, vol. II, 2ª ed., Leipzig, Teubner, 1900.
M. CASPAR, *Kepler*, New York, Aberlard-Schuman, 1959.
G. CASTELNUOVO, *Le origini del calcolo infinitesimale nell'era moderna, con scritti di Newton, Leibniz e Torricelli* (1938), Milano, Feltrinelli, 1962.
O. CHISINI, *Aree, lunghezze e volumi nella geometria elementare*, in *Questioni riguardanti le matematiche elementari*, raccolte e coordinate da F. Enriques, Bologna, Zanichelli, 1924-1927.
M. CLAGETT, *The Works of Francesco Maurolico*, in «Physis», 1974, pp. 149-198.
ID., *Archimedes in the Middle Ages*, Wisconsin, Madison, University of Wisconsin Press, 1959.
L. GEYMONAT, *Storia e filosofia dell'analisi infinitesimale*, Torino, Levrotto & Bella, 1947.
E. GIUSTI, *Bonaventura Cavalieri and the Theory of Indivisibles*, Roma, Cremonese, 1980.
ID., *Dopo Cavalieri La discussione sugli indivisibili*, in *La storia delle matematiche in Italia. Atti del Convegno*, Cagliari, 1982, pp. 85-114.
Johann Kepler (1571-1630) A Tercentenary Commemoration of His Life and Works, a cura di F.E. Brasch, Baltimore, William and Wilkins, 1931.
M. KLINE, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, New York, Oxford University Press, 1972.
A. KOYRÉ, *Études Galiléennes*, Paris, Hermann, 1966 (trad. it.: *Studi galileiani*, Torino, Einaudi, 1976).
G. LORIA, *Storia delle matematiche dall'alba delle civiltà al tramonto del secolo XIX*, Milano, Hoepli, 1950.
ID., *Storia della geometria descrittiva dalle origini sino ai giorni nostri*, Milano, Hoepli, 1921.
P. NAPOLITANI, *Metodo e statica in Valerio con edizione di due sue opere giovanili*, in «Bollettino di storia delle scienze matematiche», anno II, 1, 1982, pp. 3-86.
E. RUFINI, *Il «Metodo» di Archimede e le origini del calcolo infinitesimale nell'antichità* (1926), Milano, Feltrinelli, 1961.
P.L. ROSE, *The Italian Renaissance of Mathematics*, Genève, Droz, 1976.

VI. *La rivoluzione astronomica* (di PAOLO ROSSI)

1. *La tradizione.*

Per rendersi conto del significato della cosiddetta rivoluzione astronomica, delle ragioni stesse per le quali si parla di una rivoluzione scientifica, è opportuno richiamare alcuni aspetti fondamentali di quel millenario *sistema del mondo* alla cui distruzione Copernico, Tycho Brahe, Keplero, Galilei dettero contributi decisivi.

Bisogna rifarsi, in primo luogo, alla distinzione fra *mondo celeste* e *mondo terrestre*, fra *moti naturali* e *moti violenti*. Nella filosofia aristotelica il mondo terrestre o sublunare risulta dalla mescolanza di quattro elementi semplici: Terra, Acqua, Aria, Fuoco. Il peso o la leggerezza di un singolo corpo dipende dalla diversa proporzione secondo la quale sono in esso mescolati i quattro elementi, poiché Terra e Acqua hanno una naturale tendenza verso il basso, Aria e Fuoco verso l'alto. Il divenire e il mutamento del mondo sublunare deriva dalla agitazione o mescolanza degli elementi. Se essi non fossero mescolati, avremmo un universo in riposo: al centro una sfera di Terra, avvolta da una sfera d'Acqua, a sua volta circondata da una sfera d'Aria e il tutto sarebbe racchiuso da una sfera di Fuoco. Il moto naturale di un corpo pesante è dunque diretto *verso il basso*, quello di un corpo leggero *verso l'alto*: il moto rettilineo verso l'alto o verso il basso (concepiti come assoluti e non relativi) dipende dalla naturale tendenza dei corpi a raggiungere il loro luogo naturale, il posto che ad essi è per natura appropriato. L'esperienza quotidiana della caduta di un corpo nell'aria, o del

fuoco che sale verso l'alto, o delle bolle d'aria che vengono a galla nell'acqua conferma la teoria. Ma l'esperienza ci pone anche, di continuo, di fronte ad altri movimenti: una pietra gettata in alto, una freccia scagliata dall'arco, una fiamma deviata verso il basso dalla forza del vento. Questi sono i *moti violenti*, dovuti all'azione di una forza esterna, che ripugna alla natura dell'oggetto sul quale agisce. *Cessante causa, cessat effectus*: quando cessa quella forza, l'oggetto tende a riprendere il posto che per natura gli compete.

Il concetto di movimento, nella fisica degli aristotelici, non coincide affatto con il moto della fisica dei moderni. Il movimento è, in genere, ogni passaggio dell'essere in potenza all'essere in atto. Si configura, per Aristotele, come *moto* nello spazio, come *alterazione* nelle qualità, come *generazione e corruzione* nella sfera dell'essere. Nel « movimento » rientrano fenomeni fisici e fenomeni che noi chiamiamo chimici e biologici. Il moto non è uno *stato* dei corpi, ma un divenire o un processo. Un corpo in moto non muta solo in relazione ad altri corpi: è esso stesso, in quanto in moto, soggetto a mutamento. Il moto è una sorta di qualità che affetta il corpo. In quella fisica, com'è noto, non c'è bisogno di una causa che spieghi la persistenza della quiete, c'è bisogno di una causa che spieghi la presenza e la persistenza del moto.

Il mondo terrestre è il mondo dell'alterazione e del mutamento, della nascita e della morte, della generazione e della corruzione. Il cielo è invece inalterabile e perenne, i suoi moti sono regolari, in esso nulla nasce e nulla si corrompe, ma tutto è immutabile ed eterno. Le stelle, i pianeti (uno di essi è il Sole) che si muovono attorno alla Terra non sono formati dagli stessi elementi che compongono i corpi del mondo sublunare, ma da un quinto elemento divino: l'etere o *quinta essentia*, che è solido, cristallino, imponderabile, trasparente, non soggetto a modificazioni. Della stessa materia sono fatte le sfere celesti. Sull'equatore di queste sfere ruotanti (come « nodi in una tavola di legno ») sono fissati il Sole, la Luna, gli altri pianeti.

Al moto rettilineo, difforme e sempre limitato nel tempo (che è proprio dei corpi che si muovono nel mondo terrestre) si contrappone il moto circolare, uniforme e perenne delle sfere e dei corpi celesti. A differenza del rettilineo, il moto circolare è perfetto e di conseguenza adatto alla natura perfetta dei cieli. Esso non ha inizio e non ha fine, non tende verso qualcosa, ritorna perennemente su se stesso e prosegue in eterno. L'etere, fatta eccezione per il mondo terrestre, riempie tutto l'universo. Limitato dalla sfera delle stelle fisse, l'universo è finito. La sfera divina, o primo mobile, trasporta le stelle fisse e produce quel moto che si trasmette, per contatto, alle altre sfere e giunge sino al cielo della Luna che costituisce il limite inferiore del mondo celeste. Alla Terra non può competere, *per natura*, alcun moto circolare. Essa è immobile al centro dell'universo. La tesi della sua centralità

e immobilità non è solo confermata dall'ovvia esperienza quotidiana, è uno dei fondamenti o pilastri dell'intera fisica aristotelica, di quella terrestre come di quella celeste.

La grandiosa macchina celeste che Aristotele aveva teorizzato e che andò poi variamente modificandosi e complicandosi nei secoli successivi era in realtà la trasportazione, sul piano della realtà e della fisica, del modello, puramente geometrico e astratto, elaborato da Eudosso di Cnido nella prima metà del IV secolo a.C. Le sfere di cui aveva parlato Eudosso non erano, come poi per Aristotele, enti fisici reali, ma pure finzioni o artifici matematici capaci di dar conto, mediante una costruzione puramente intellettuale, delle apparenze sensibili, capaci cioè di giustificare e spiegare il moto dei pianeti, di «salvare i fenomeni» o giustificare le apparenze.

Questa contrapposizione di un'astronomia concepita come costruzione di ipotesi ad un'astronomia che intende presentarsi come una descrizione di eventi reali, avrà, come vedremo, grande importanza. In ogni caso, il divorzio fra la cosmologia e la fisica da un lato e un'astronomia puramente «calcolistica» e matematica dall'altro, andrà accentuandosi nel mondo antico, nell'epoca che vide Alessandria d'Egitto al centro della cultura filosofica e scientifica. La troviamo esplicitamente teorizzata dal maggior astronomo dell'antichità: Claudio Tolomeo, vissuto ad Alessandria nel secondo secolo dell'èra cristiana. Per più di un millennio la *Syntaxis*, comunemente nota come *Almagesto*, resta a fondamento del sapere astrologico e astronomico. Attraverso una complicata serie di accorgimenti è possibile dar conto dei moti celesti. L'universo, limitato dalla sfera delle stelle fisse, ha al suo centro la Terra immobile. La sfera del cielo ruota intorno ad un asse fisso, come è dimostrato dal moto delle stelle circumpolari e dal fatto che le altre stelle sorgono e tramontano agli stessi punti dell'orizzonte. I pianeti ruotano attorno al centro dell'universo. Tutti i loro movimenti irregolari (differente distanza dalla Terra, retrogradazione) devono essere ricondotti a moti circolari. Gli eccentrici, gli epicicli, gli equanti (i primi due risalgono ad astronomi greci anteriori a Tolomeo) rispondono precisamente a questo scopo.

Le sfere di Aristotele erano enti reali, solidi e cristallini. Gli eccentrici e gli epicicli di Tolomeo (che inizia sempre l'esposizione dei moti planetari con l'espressione «immaginiamoci un cerchio») non hanno realtà fisica. Sono, come afferma Proclo (410-485 d.C.) alla fine delle *Hypotyposes* (o esposizione della teoria planetaria di Tolomeo) solo il mezzo più semplice per spiegare i moti dei pianeti. L'astronomia veniva presentata da Tolomeo come campo di attività per i matematici, non per i fisici. Ma il complicato quadro dell'universo che restò nella sostanza ben saldo fino all'età di Copernico non è riducibile alle dottrine finora ricordate. Fu in realtà una mescolanza

di fisica aristotelica e di astronomia tolemaica, inserita in una cosmologia che attingeva largamente al misticismo delle correnti neoplatoniche, alle vedute dell'astrologia, alla teologia dei Padri della Chiesa e dei filosofi della Scolastica. Basta pensare, per rendersene conto, all'universo di Tommaso d'Aquino (1225-1274) o a quello descritto nella *Divina Commedia* di Dante Alighieri (1265-1321) dove alle sfere celesti corrispondono le varie potenze angeliche.

Semplificando molto le cose, è possibile tentare di elencare i presupposti che fu necessario abbattere ed abbandonare per costruire una nuova astronomia e una nuova fisica:

1) La distinzione di principio tra una fisica del Cielo e una fisica terrestre, che risultava dalla divisione dell'universo in due sfere, l'una perfetta, l'altra soggetta al divenire.

2) La convinzione (che conseguiva da questo primo punto) del carattere necessariamente circolare dei moti celesti.

3) Il presupposto dell'immobilità della Terra e della sua centralità nell'universo che era confortato da una serie di argomenti dall'apparenza irrefutabile (il moto terrestre proietterebbe in aria oggetti ed animali) e che trovava conferma nel testo stesso delle Scritture.

4) La credenza nella finitezza dell'universo e in un mondo chiuso che è legata alla dottrina dei luoghi naturali.

5) La convinzione, strettamente connessa alla distinzione fra moti naturali e violenti, che non ci sia bisogno di addurre nessuna causa per spiegare lo stato di quiete di un corpo, mentre, al contrario, ogni movimento deve essere spiegato o come dipendente dalla forma o natura del corpo o come provocato da un motore che lo produce e lo conserva.

6) Il divorzio, che si era andato rafforzando, fra le ipotesi matematiche dell'astronomia e la fisica.

Nel corso di circa cento anni (all'incirca fra il 1610 e il 1710) ciascuno di questi presupposti venne discusso, criticato, respinto. Ne risultò, attraverso un processo difficile (a volte tortuoso), una nuova immagine dell'universo fisico destinata a trovare il suo compimento nell'opera di Isaac Newton, in quella grandiosa costruzione che, dopo Einstein, chiamiamo oggi la «fisica classica». Ma si trattò di un rifiuto che presupponeva un radicale rovesciamento di quadri mentali e di categorie interpretative, che implicava una nuova considerazione della natura e del posto dell'uomo nella natura.

2. *Copernico: il moto della Terra e la centralità del Sole.*

L'astronomo polacco Niklas Kopperlingk (1473-1543) latinizzò il suo nome in *Copernicus*. Quel nome è diventato, nell'età moderna, il simbolo

stesso di una grande svolta del pensiero, l'atto di nascita di una nuova età e di una rivoluzione intellettuale. Niccolò Copernico, come è stato più volte sottolineato, non assunse, né nella sua vita né nelle sue opere, alcun atteggiamento pionieristico o rivoluzionario. Ritenne, da buon umanista, che la possibilità stessa di un nuovo metodo di calcolo dei moti delle sfere (capace di porre fine alle incertezze degli astronomi) andasse prima di tutto ricercata nei testi dei filosofi antichi. Presentò la sua dottrina come un tentativo di far rivivere le antiche tesi di Pitagora e di Filolao. Fu estremamente cauto ed esitante. Ebbe preoccupazioni notevoli circa il «disprezzo» che la sua strana e inusitata dottrina sul moto della Terra poteva suscitare nel mondo degli ecclesiastici e dei professori universitari. Scrisse la sua opera maggiore, il *De revolutionibus orbium coelestium* (1543), in continuo parallelismo con l'*Almagesto* di Tolomeo seguendolo libro per libro e sezione per sezione, tanto che Keplero poté osservare che egli, più che la natura, aveva interpretato Tolomeo.

Copernico era nato a Torun (in tedesco Thorn) sulla Vistola, in una città che era passata nel 1466 sotto la sovranità del re di Polonia. Figlio di un mercante, fu adottato da uno zio materno (che divenne vescovo di Warmja nel 1498). Dopo gli studi all'Università di Cracovia (ove gli fu maestro di astronomia Alberto da Bruzdewo) fu spinto dallo zio a un soggiorno nelle Università italiane. Lo troviamo registrato, nel 1496, nei rotoli della *Natio Germanorum* dell'Università di Bologna ove (come afferma Reticus) «fu piuttosto amico e assistente che allievo» dell'astronomo Domenico Maria Novara (1454-1504). Nel 1500 Copernico passò a Roma e, l'anno seguente, fece ritorno in patria per prendere possesso del canonicato di Frauenburg. Ma tornò in Italia nello stesso anno: a Padova, dove continuò a studiare legge e medicina per quattro anni, a Ferrara dove conseguì il dottorato in diritto canonico. Nel 1506, dopo nove anni di soggiorno in Italia, tornò in Polonia come segretario e medico presso lo zio. Dopo la morte di quest'ultimo, nel 1512, si stabilì a Frauenburg dove rimase per più di trent'anni, lavorando fino alla morte al suo capolavoro.

Negli anni fra il 1507 e il 1512 (ma su queste date gli specialisti hanno opinioni contrastanti), Copernico aveva steso un *De hypothesibus motuum coelestium commentariolus*. In esso venivano presentate le sette *petitiones* che dovevano dar luogo ad una nuova astronomia:
1) Non esiste un solo centro di tutti gli orbi celesti o sfere (ci sono, a differenza che in Tolomeo, due centri di rotazione: la Terra che è il centro di rotazione della Luna, il Sole che è al centro della rotazione degli altri pianeti);
2) Il centro della Terra non coincide con il centro dell'universo, ma solo con il centro della gravità e della sfera della Luna (questa *petitio* riapriva il problema di una spiegazione della gravità);

3) Tutte le sfere ruotano attorno al Sole (che è dunque eccentrico rispetto al centro dell'universo);
4) Il rapporto fra la distanza Terra-Sole e l'altezza del firmamento è minore del rapporto fra il raggio terrestre e la distanza Terra-Sole. Quest'ultima è pertanto impercettibile in rapporto all'altezza del firmamento (se l'universo ha così grandi dimensioni, non avverrà che il moto della Terra dia luogo ad un moto apparente delle stelle fisse);
5) Tutti i moti che appaiono nel firmamento non derivano da moti del firmamento, ma dal moto della Terra. Il firmamento rimane immobile, mentre la Terra, con gli elementi a lei più vicini (l'atmosfera e le acque della sua superficie) compie una completa rotazione sui suoi poli fissi in un moto diurno;
6) Ciò che ci appare come movimenti del Sole non deriva dal suo moto, ma dal moto della Terra e della nostra sfera con la quale ruotiamo attorno al Sole come ogni altro pianeta. La Terra ha, pertanto, più di un movimento;
7) L'apparente moto retrogrado e diretto dei pianeti non deriva dal loro moto, ma da quello della Terra. Il moto della sola Terra è sufficiente a spiegare tutte le disuguaglianze che appaiono nel cielo (i moti retrogradi dei pianeti diventano *moti apparenti*, dipendenti dal moto della Terra).

Il testo del *Commentariolus* fu conosciuto da molti nel manoscritto. Copernico aveva nel frattempo affidato il manoscritto del *De revolutionibus* al giovane Georg Joachim Rheticus (1514-1576, il vero nome era Lauschen latinizzato in Rheticus a indicare la provenienza dall'antica provincia romana della Rezia). Discepolo e ammiratore di Copernico, Rheticus pubblicò, nel 1540, la celebre *Narratio prima* che, accanto a una serie di considerazioni astrologiche sulla caduta dell'Impero Romano, la nascita dell'Impero

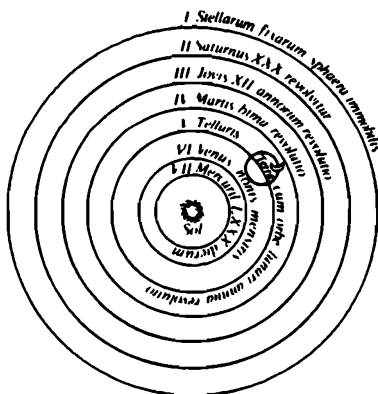



Figura 1. — Il sistema del mondo di Copernico.

Musulmano e la seconda venuta di Cristo, contiene una limpida esposizione della cosmologia copernicana. Attraverso questo scritto che, non più anonimo, fu ristampato a Basilea l'anno seguente, il mondo dei dotti ebbe più ampia notizia delle idee e dell'opera di Copernico.

Rheticus insisteva, con grande energia, sulla maggiore semplicità e armonia del sistema copernicano rispetto a quello tolemaico. Ogni anno i pianeti mostrano un movimento diretto, stazionario, retrogrado, ci si presentano all'apogeo e al perigeo: tutti questi fenomeni possono essere spiegati mediante il moto uniforme del globo terrestre. Se si pone il Sole fermo al centro dell'universo e la Terra che ruota attorno ad esso su un eccentrico o orbe magno, la vera intelligenza delle cose celesti viene a dipendere dai moti regolari e uniformi *del solo globo terrestre*. La natura, come insegna Galeno, «non fa niente che sia privo di senso». Se vediamo che «mediante questo solo movimento della Terra trova spiegazione un numero quasi infinito di fenomeni, perché non dovremmo attribuire a Dio, creatore della natura, l'abilità che osserviamo presso i semplici fabbricanti di orologi?» Essi, proseguiva Rheticus, evitano nei loro meccanismi ruote inutili o tali che la loro funzione possa essere adempiuta meglio da un'altra, in virtù di un piccolo mutamento di posizione. Perché Copernico non doveva adottare la «conveniente teoria» del moto terrestre? Adottando quella ipotesi, per la costruzione di una scienza esatta dei fenomeni celesti «bastava la sola ottava sfera immobile, il Sole essendo anch'esso immobile al centro dell'universo, e per spiegare i moti degli altri pianeti bastavano combinazioni di epicicli ed eccentrici, di eccentrici ed eccentrici, di epicicli ed epicicli» (1541, 460-461).

L'attribuzione del movimento alla Terra consentiva di riaffermare la circolarità dei moti celesti. Mentre nel sistema tradizionale il moto di

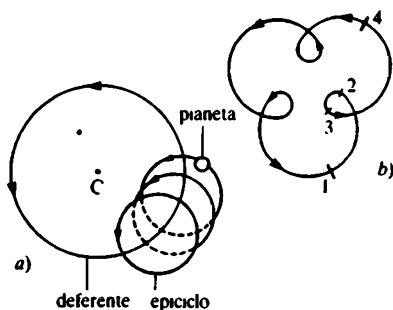



Figura 2. — La teoria degli *epicicli* afferma che i pianeti non ruotano intorno al centro dell'orbita, ma ruotano, a loro volta, intorno all'orbita o *deferente*, cioè intorno ad un centro trasportato esso stesso da un moto di rivoluzione intorno al centro dell'orbita.

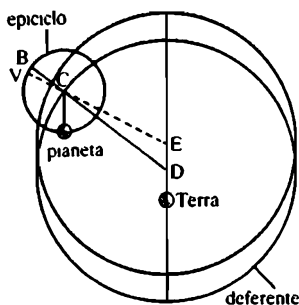



Figura 3. — L'equante: uno degli accorgimenti impiegati nel modello planetario tolemaico (che modificava la cosiddetta regola platonica del moto uniforme) era il punto equante con il suo circolo equante. Il centro dell'epiciclo C non si muove uniformemente sul deferente (non si muove cioè uniformemente rispetto al centro D del deferente). Si suppone invece che il centro C dell'epiciclo (sul quale si muove il pianeta) si muova uniformemente rispetto ad un altro punto E (punto equante) situato sulla linea degli absidi (ipogeo e perigeo) dalla parte opposta della Terra rispetto al centro D.

retrocessione veniva spiegato collocando il pianeta su un epiciclo il cui centro ruota a sua volta intorno alla Terra sul deferente del pianeta, nel nuovo sistema i pianeti si muovono di moto continuo e tutti nella stessa direzione (vedi figg. 1, 2). Le irregolarità dei loro moti vengono attribuite al punto di vista, di momento in momento differente, dell'osservatore posto sulla Terra in movimento. Gli astronomi tradizionali, come dirà Copernico nella *Dedica* a Paolo III, «hanno ammesso cose che sembrano contrarie ai primi principi circa l'uniformità del movimento». Le «cose» ingiustamente ammesse erano gli *equanti* (vedi fig. 3) che violavano il principio della circolarità e costituivano un'offesa al principio della regolarità. E degli equanti non c'era più bisogno nel nuovo sistema. Non solo: «l'ordine e la grandezza delle stelle e di tutti gli orbi e lo stesso cielo diventano un tutto così collegato che in nessuna parte di esso si può spostare qualcosa senza crear confusione delle restanti parti e di tutto l'insieme» (1949, 5). Non era più possibile, nel nuovo sistema, ridurre o allargare a piacere l'orbita di ogni pianeta, tenendo fissi gli altri.

Il testo del *De revolutionibus* (pubblicato nel maggio del 1543) giunse, così vuole la tradizione, al letto di morte di Copernico. Nelle pagine della *Dedica* anche Copernico, come già aveva fatto Rheticus, insisteva sulla maggiore semplicità e armonia del sistema. Contrapponeva il nuovo all'antico insistendo sui «disaccordi», le «insicurezze», la mancanza di risultati, le contraddizioni dei seguaci della tradizione. Essi non sono stati in grado di trovare o ricostruire «la forma del mondo e la esatta simmetria delle sue parti». Hanno agito come chi volesse dar luogo ad una figura umana

mettendo insieme capo, mani, piedi e altre membra di lunghezza differente e niente affatto armoniche fra loro. Incapaci di «tener conto del disegno unitario di un solo corpo» hanno generato «un mostro».

La rivoluzione copernicana non consistette in un perfezionamento dei metodi dell'astronomia, né in una scoperta di nuovi dati, ma nella costruzione di una cosmologia nuova fondata sui dati stessi forniti dall'astronomia tolemaica. Questa cosmologia è fortemente legata ad alcune fondamentali tesi dell'aristotelismo: l'universo copernicano è perfettamente sferico e finito; la sfericità alla quale appetiscono tutti i corpi costituisce una forma perfetta ed è una totalità in sé conchiusa giustamente attribuita ai corpi divini; il moto circolare delle sfere cristalline deriva dal fatto che la mobilità propria della sfera è di muoversi in circolo (*mobilitas sphaerae est in circulum volvi*), la condizione di immobilità del Sole (che è immobile come il cielo delle stelle fisse) deriva dalla sua natura divina, la sua centralità dal fatto che questa «lucerna del mondo» chiamata da altri «mente e rettore dell'universo» è collocata nel luogo migliore dal quale «può illuminare ogni cosa simultaneamente» (1949, 25-27).

La semplicità del nuovo sistema era più apparente che reale (vedi fig. 4):

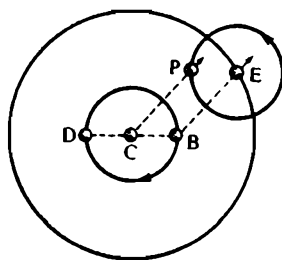



Figura 4. — Confronto dei sistemi copernicano e tolemaico. Nel sistema copernicano C è il Sole, centro del sistema; B è la Terra; E un pianeta esterno. Nel sistema tolemaico C è la Terra; D il Sole; E il centro dell'epiciclo del pianeta; P il pianeta. La linea che congiunge la Terra al pianeta, nel secondo caso, sarà parallela alla linea che congiunge la Terra al pianeta nel primo caso. L'angolo fra questa linea e la linea Terra-Sole sarà lo stesso in entrambi i sistemi. Di conseguenza la posizione apparente del pianeta è la stessa (riprodotto da M. Boas, *The Scientific Renaissance*, Collins, London 1962, p. 84).

per giustificare i dati delle osservazioni, Copernico era costretto, in primo luogo, a non far coincidere il centro dell'universo con il Sole (il suo sistema è stato definito meglio come *eliostatico* che come *eliocentrico*), ma con il punto centrale dell'orbita terrestre; in secondo luogo a reintrodurre, come in Tolomeo, una serie di cerchi ruotanti attorno ad altri cerchi; ad attribuire

infine alla Terra (oltre al moto di rotazione attorno al suo asse e di rivoluzione attorno al Sole) un terzo movimento di declinazione (*declinationis motus*) per giustificare la invariabilità dell'asse terrestre rispetto alla sfera delle stelle fisse.

La rivoluzione copernicana — anche non volendo tener conto delle valenze ideologiche che verrà assumendo e che verranno da essa ricavate — aveva questo di caratteristico: non si limitava a contrapporre alcune tesi nuove alle tesi tradizionali, riusciva davvero a sostituire Tolomeo, a migliorare l'*Almagesto* sul piano dei calcoli e della costruzione delle tavole planetarie. Le nuove tavole, note come *tavole pruteniche* (1551), elaborate da Erasmo Reinhold (1511-1553) su basi copernicane, furono accolte anche da strenui avversari del nuovo sistema del mondo, e lo stesso Reinhold non fu mai copernicano. Il sistema presentato nel *De revolutionibus* era fondato su una raffinata matematica pitagorica che poteva essere apprezzata dagli astronomi professionali. Ad alcuni di essi quel sistema apparve non solo più semplice e armonioso del precedente, ma anche più in accordo con il presupposto metafisico (che Copernico mantiene ben saldo) della perfetta circolarità dei moti celesti.

Molti fondamentali elementi che costituiscono la «rivoluzione astronomica» (eliminazione degli eccentrici (vedi fig. 5), degli epicicli, della realtà

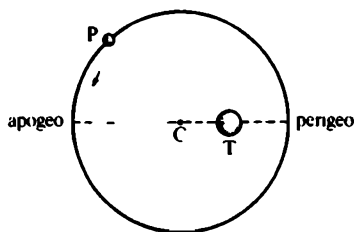



Figura 5. — Eccentrico: la Terra non è esattamente al centro della circonferenza C, ma a qualche distanza da esso, in T. Se il punto P corrisponde ad un pianeta (o al Sole), esso, visto dalla Terra in T, non apparirà muoversi uniformemente in rapporto alle stelle che sono supposte fisse, anche se il suo movimento lungo la circonferenza è uniforme. In tale sistema *eccentrico*, vi sarà un punto in cui il Sole, o un determinato pianeta, sarà a un certo momento a una distanza minima dalla Terra (*perigeo*) e a una distanza massima (*apogeo*).

delle sfere solide, infinità dell'universo) sono del tutto assenti in Copernico. Ci sono tuttavia testi che, senza presentarsi come rivoluzionari, provocano grandiose rivoluzioni intellettuali. Questo fu il caso di Copernico, come sarà quello di Darwin. Essi vengono letti, anche se in modo approssimativo, da un numero crescente di non specialisti. Colpiscono non solo l'intelletto, ma

l'immaginazione degli uomini, eliminano vecchie e consolidate risposte e aprono una quantità di problemi nuovi. Nel caso di Copernico: che cosa è la gravità e perché i corpi pesanti cadono sulla superficie di una Terra in movimento? Che cosa muove i pianeti e come essi sono trattenuti nelle loro orbite? Quanto è esteso l'universo e qual è la distanza fra la Terra e le stelle fisse? Ma si aprivano problemi nuovi non solo all'interno delle scienze costituite. L'ammissione del moto terrestre e l'accettazione del nuovo sistema comportavano non solo un rovesciamento dell'astronomia e della fisica e la necessità di una loro ristrutturazione, ma anche una modificazione delle idee sul mondo, una valutazione nuova della natura e del posto dell'uomo nella natura. Ci sono, in ogni sistema in instabile equilibrio (e tale era senza dubbio l'astronomia dei tempi di Copernico) punti problematici, che non si possono toccare. Il moto della Terra era uno di questi.

3. *Il mondo sbriciolato: la grande controversia.*

Nei primi decenni del Cinquecento non erano mancati tentativi di sostituire al sistema tolemaico sistemi nuovi. Il cosentino Giovanni Battista Amici, nato nel 1512 e assassinato a Padova a ventisette anni, aveva pubblicato a Venezia, nel 1536, un libretto intitolato *De motibus corporum coelestium iuxta principia peripatetica sine excentricis et epiciclis*. Riprendendo le tesi di Eudosso (370 ca. a.C.) e di Aristotele, vi proponeva un complicato sistema di sfere concentriche o omocentriche (10 per ogni pianeta e 11 per la Luna). Nella stessa direzione, indipendentemente da Amici, si muoveva Girolamo Fracastoro (1483-1553) negli *Homocentrica* pubblicati a Venezia nel 1538. Il libro, come il *De revolutionibus*, è dedicato a Paolo III e tratta analiticamente del funzionamento di una improbabile macchina dell'universo costituita da 77 sfere. In essa il moto si propaga dalle sfere esterne a quelle interne senza che il moto di queste ultime influenzi le prime e la variazione della luminosità dei pianeti viene fatta dipendere dalla variabile trasparenza delle sfere materiali.

L'indifferenza per questi tentativi, che non erano in grado di porsi in alcun modo come vere e proprie alternative al sistema tradizionale, rende tanto più significative le prese di posizione che immediatamente seguirono (in qualche caso precedettero) la pubblicazione del *De revolutionibus*. Già nel 1539 Lutero, in uno dei *Discorsi a tavola* fa riferimento ad « un astronomo da quattro soldi » che afferma il moto della Terra, che intende sovvertire tutta l'astronomia, che si pone in contrasto con la Scrittura ove si dice che Giosuè ordinò al Sole, e non alla Terra, di fermarsi. Sei anni dopo la pubblicazione del capolavoro di Copernico, Filippo Melantone, negli *Initia doctrinae physicae*, ribadisce che coloro i quali credono che l'ottava sfera e il Sole non

ruotino attorno alla Terra sostengono argomenti empi e pericolosi contrari all'onestà e alla decenza. Calvino, senza mai citare Copernico, riaffermava energicamente il valore letterale delle Scritture.

Si è molto discusso sull'atteggiamento di protestanti e cattolici di fronte al copernicanesimo. Una delle leggende storiografiche più diffuse (non solo nei manuali) è quella che afferma la sostanziale indifferenza per la questione della Curia Romana e dei teologi scolastici. Solo tre anni dopo la morte di Copernico, nel 1546, il domenicano Giovanni Maria Tolosani, legato a Bartolomeo Spina, maestro del Sacro Palazzo e per l'occasione portavoce quasi ufficiale delle reazioni della Curia, prendeva energicamente posizione contro il nuovo sistema nel *De veritate Sacrae Scripturae* (che è rimasto inedito fino al 1975). Il copernicanesimo, agli occhi di Tolosani, ha un difetto costitutivo ed essenziale: viola il fondamentale e irrinunciabile principio della *subalternatio scientiarum* in base al quale «una scienza inferiore ha bisogno della scienza superiore». Non si tratta di una questione di poco conto. La prima delle scienze, la teologia, offre al cosmologo una descrizione della struttura fisica dell'universo e nessuna scienza può essere in contrasto con la teologia: «Copernico, abile nella scienza matematica e astronomica, è difettoso nelle scienze fisiche e dialettiche, è imperito nelle Scritture». Il testo del Tolosani verrà letto con cura da un altro domenicano, Tommaso Caccini, la cui violenta presa di posizione, espressa nella predica del 20 dicembre 1614 in Santa Maria Novella, è alle radici della condanna del 1616 che dichiarava «stolta ed assurda in filosofia e formalmente eretica» la teoria di Copernico. Nella *Dedica* a Paolo III, Copernico ne aveva invocato l'autorità e il giudizio perché «impedisse il morso dei calunniatori, nonostante sia proverbiale che non c'è rimedio alcuno contro il morso dei sicofanti» (cfr. Camporeale 1977-78, Garin 1975, 283-295).

I morsi si faranno, col tempo, molto numerosi, ma, come sempre di fronte al nuovo, non mancarono caute adesioni di specialisti, entusiasmi assai forti anche se tecnicamente poco fondati, sdegnati rifiuti e, soprattutto, manifestazioni di smarrimenti e di incertezze. Il *De revolutionibus* fu ripubblicato a Basilea nel 1556 (tredici anni dopo la prima edizione) con in appendice la *Narratio prima* di Rheticus, il testo che meglio serviva ai lettori non specialisti per intendere il significato del nuovo sistema del mondo. Le *Tavole pruteniche* di Reinhold (1551) furono riviste e ampliate nel 1557. L'anno precedente era stato pubblicato a Londra *The castle of knowledge* del medico e matematico Robert Recorde (1510 ca. - 1558). Nel dialogo tra un Maestro e uno Scolaro, il primo afferma che è prematuro discutere del moto della Terra, dato che l'idea della sua immobilità è così fortemente penetrata nelle menti da far apparire folle la tesi opposta; il secondo nega che siano sempre vere le opinioni accolte da molti come tali. La risposta del Maestro

rinvia al futuro per una risposta circa la verità, ma si richiama a Copernico come uomo di vasto sapere, grande esperienza ed eccellente capacità di osservazione.

Gli astronomi furono in genere molto cauti nell'accettare una scelta tra la nuova verità e il vecchio errore. Respinsero (con le due grandi eccezioni di Keplero e di Galilei) l'idea stessa di una dichiarazione di superamento del sistema tolemaico. Dopo il successo delle nuove tavole, predominava fra di essi l'atteggiamento di Thomas Blundeville il quale affermava (nel 1594) che con l'aiuto di una falsa ipotesi Copernico era riuscito a dare dimostrazioni più esatte di quanto non fosse mai stato fatto prima. Michael Mastlin (1550-1631), professore di astronomia a Tubinga, inserì nelle ultime edizioni dell'*Epitome astronomiae* (1588) appendici di esposizione del sistema copernicano. Maestro di Keplero, è da presumere istruisse l'allievo sul nuovo sistema. Collaborò anche alla stesura e alla stampa del *Mysterium cosmographicum* di Keplero (1596) che lo ricompensò per il lavoro svolto (che comprendeva anche difficili calcoli) con il regalo di una coppa d'argento dorata e sei talleri d'argento. A quella edizione, non senza un qualche disappunto di Keplero, egli fece aggiungere il testo della quarta edizione della *Narratio* di Rheticus. Intorno al 1587, Christopher Rothmann, astronomo del Langravio Guglielmo IV di Assia-Cassell, difese con energia, nella sua corrispondenza con Tycho Brahe, la validità del copernicanesimo. In quelle lettere egli confutava le più tradizionali obiezioni contro il moto della Terra e affermava la insostenibilità di una interpretazione letterale delle Scritture che costringerebbe a credere anche all'esistenza delle acque celesti (una questione che era stata, per tutta la cosmologia del Medioevo, di importanza centrale).

Il matematico Giovanni Battista Benedetti (1530-1590) nel *Diversarum speculationum mathematicarum et physicarum liber* (1585) nega valore agli argomenti ricavati dall'aristotelismo contro Copernico. Ai suoi occhi, quest'ultimo «ha spiegato in modo divino la teoria di Aristarco». Tra i filosofi, accanto a Thomas Digges e a Giordano Bruno (sui quali si veda il successivo capitolo), è da ricordare Francesco Patrizi da Cherso (1529-1597), professore di filosofia platonica prima a Ferrara e poi a Roma, dove venne chiamato da Clemente VIII. Al Pontefice, Patrizi si era rivolto perché, anche in vista di un recupero dei Luterani alla Chiesa, venisse insegnato in tutte le scuole il platonismo ermetizzante al posto della deleteria filosofia aristotelica. Nelle *Obiezioni a Telesio*, che furono spedite a quest'ultimo nel giugno del 1572, e successivamente nella *Nova de universis philosophia* (1591), Patrizi nega l'esistenza delle sfere celesti alle quali, «come nodi in una tavola», sarebbero infissi le stelle e i pianeti. Anche Copernico, egli afferma, ritiene a torto che i corpi celesti siano trasportati da sfere e siano infissi in

esse. Quest'errore di fondo (che Patrizi attribuisce erroneamente anche a Tycho Brahe), insieme alla credenza nella inalterabilità e incorruttibilità dei cieli, ha condizionato negativamente tutta la storia dell'astronomia. Perché non rinunciare a queste tesi e non tornare a pensare, con Pitagora e Platone, che le stelle siano «grandi animali celesti» dotati di anime, di volontà e di appetiti? Gli uomini, trascinati da Aristotele, sono stati finora incapaci di concepire movimenti di corpi celesti entro un cielo liquido. Al cielo non può essere attribuita né solidità, né durezza. Indipendentemente da Tycho, anche Patrizi considera la nuova stella del 1572 un fatto decisivo: proprio come la nuova stella, i pianeti si avvicinano alla Terra e si allontanano da essa; così facendo devono attraversare le immaginarie sfere solide falsamente inventate dagli astronomi. La visione che Patrizi ebbe dell'universo appare, dal privilegiato punto di vista di noi moderni, una mescolanza strana. La Terra, nel suo sistema, è ancora al centro del cosmo e il Sole ruota attorno alla Terra (come nel sistema di Tycho). La Terra (come vuole Copernico) è in movimento. Ma Patrizi accetta solo uno dei tre movimenti teorizzati da Copernico, quello diurno. Le stelle, come grandi animali, si muovono da sole, non sono fissate a sfere reali (come per Tycho Brahe), ma si muovono a causa di un'anima che è in esse presente (come per il giovane Keplero). Nel cielo non esistono zone separate: esso è unico, continuo e fluido. Il moto delle stelle fisse è apparente e dipende dal moto diurno della Terra attorno al suo asse. Le stelle non sono tutte alla stessa distanza dalla Terra, ma sparse in una infinita profondità.

Proprio come Patrizi, anche William Gilbert (1540-1603) 1) non è un astronomo e non ha alcuna specifica competenza astronomica; 2) è vicino a forme di vitalismo mistico; 3) rifiuta l'esistenza delle sfere celesti; 4) è parzialmente copernicano nel senso che accetta anch'egli il moto diurno, ma non quello annuo della Terra. Nel *De magnete* (1600) Gilbert aveva sostenuto il moto terrestre proprio rifiutando la tesi aristotelica della animazione del Cielo e della non-animazione della Terra: la Terra, dotata di virtù magnetiche e di un impulso motorio, non è meno animata dei corpi celesti. Nel *De mundo nostro sublunari philosophia novas* (pubblicato postumo nel 1651, ma che era circolato manoscritto ed era stato letto anche da Francesco Bacone) la forza magnetica della Terra viene estesa fino alla Luna e concepita come la causa non solo delle maree, ma della persistenza della Luna nella sua orbita attorno alla Terra.

La *Semaine ou création du monde* (1578) di Guillaume du Bartas (1544-1590) è uno dei poemi didascalici più diffusi che ebbe circolazione anche in Inghilterra. La nuova cosmologia vi veniva ridicolizzata:

Si aggirano pel mondo alcuni folli,
spiriti sciocchi, a correre non usi
la quieta acqua dei mari comuni.
Tali sono (nel mio pensiero almeno)
quei dotti che ritengono (quanto assurda
sia questa beffa giudica tu stesso)
che né il Cielo né le stelle attorno al globo
terrestre compiano le loro eterne danze,
ma che la Terra la sua mole enorme
volga in ventiquattr'ore sul suo asse,
simile ai mozzi, che abituati a terra,
iniziano la prima volta a navigare,
e che, mentre la nave prende il largo,
han l'impressione che fugga via la riva.

Le linee di demarcazione fra chi rifiuta o accetta il copernicanesimo, o esprime incertezze di fronte al nuovo, non coincidono affatto con quelle che separano gli astronomi professionali dai filosofi o dai letterati. I primi sostenitori della verità copernicana, in Inghilterra, non sono certo facilmente inseribili fra i «moderni» o gli assertori del meccanicismo e del nuovo metodo scientifico. Robert Recorde, che già abbiamo ricordato, concepisce l'astronomia come *ancilla astrologiae*; il matematico copernicano John Dee (1527-1608) è autore, oltre che della celebre prefazione a Euclide, della *Monas hieroglyphica* (1564) che intende svelare i segreti delle virtù sovracelesti attraverso i misteri della Cabala, le composizioni numeriche dei Pitagorici e il Sigillo di Ermete; a Ermete Trismegisto, e al poema *Zodiacus vitae* (1534) del ferrarese Palingenio Stellato (Pier Angelo Manzolli, 1503 ca. 1543) si richiama Thomas Digges (1543-1575) che nella *Perfit description of caelestiall orbes* aggiunta nel 1576 al *Prognostication everlasting* del padre Leonhard parla di una immobile orbita delle stelle fisse che si estende infinitamente verso l'alto e che egli concepisce come «il palazzo della felicità e la vera corte degli angeli celesti privi di affanni, che riempiono la dimora degli eletti». Intorno al 1585, Giordano Bruno (1548-1600) si era fatto difensore, in Inghilterra, della visione copernicana del mondo. Nella *Cena delle ceneri*, nel *De l'infinito, universo e mondi* (1584) aveva presentato la teoria di Copernico sullo sfondo della magia astrale e dei culti solari, aveva associato il copernicanesimo con la tematica presente nel *De vita coelitus comparanda* di Marsilio Ficino, aveva visto nel «diagramma» copernicano il «geroglifico» della divinità: la Terra si muove perché vive attorno al Sole; i pianeti, come stelle viventi, compiono con essa il loro cammino; altri innumerevoli mondi, che si muovono e vivono come grandi animali, popolano l'infinito universo. Nei testi di William Gilbert, come si è visto,

non mancavano temi vitalistici né richiami a Ermete, Zoroastro, Orfeo.

La teoria eliocentrica venne spesso associata ad alcuni dei temi più caratteristici della tradizione magico-ermetica. Prendendo posizione contro quest'ultima tradizione, non era affatto impossibile coinvolgere i copernicani e Gilbert nel contesto di un più generale rifiuto del platonismo mistico. In questo contesto, così ricco di incertezze e di equivoci, va considerato anche l'atteggiamento assunto da Francesco Bacone, fra il 1610 e il 1623, nei confronti del copernicanesimo (cfr. il successivo paragrafo). Esso è stato più volte utilizzato (per esempio dagli spiritualisti del secondo Ottocento e dai neopositivisti e popperiani del Novecento) per esprimere astoriche condanne. Parlare di «arretratezza scientifica» di fronte alle incertezze manifestate da molti è un non senso. Bacone, che si è entusiasmato nel 1612 per le scoperte di Galileo, muore nel 1626. La «conversione» di Marin Mersenne (1588-1648) al copernicanesimo è degli anni 1630-1634. Nei *Novarum observationum libri* del 1634 il matematico Gilles Personne de Roberval (1602-1675) afferma che non può in alcun modo dirsi quale dei tre sistemi del mondo che si contendono il campo sia quello vero, dato che può darsi «che tutti e tre i sistemi siano falsi e quello vero ci sia sconosciuto».

Molti storici sembrano essersi dimenticati che nel 1632 Galilei non sta polemizzando (nel *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo*) contro dei fantasmi. Combatte contro avversari reali. Nella Università di Salamanca, gli statuti del 1561, stabilivano che il corso di matematica doveva comprendere Euclide, e Tolomeo o Copernico a scelta degli studenti. Sembra che Copernico non venisse mai scelto. E inoltre il caso di Salamanca è davvero eccezionale. Nelle università, anche dei paesi protestanti, i due (o tre) sistemi del mondo vengono insegnati, l'uno accanto all'altro, fino alle ultime decadi del Seicento. Per rendersi conto che la polemica contro la «fabbrica» di Aristotele e di Tolomeo conserva una sua precisa funzione anche oltre la metà del Seicento basta aprire il testo dell'*Academiarum examen* pubblicato a Londra nel 1654 da John Webster (1610-1682) medico e cappellano dell' Armata del Parlamento durante la guerra civile. Uno dei punti discriminanti fra antichi e moderni appare a Webster la credenza o meno nelle sfere celesti. Copernico, Galilei, Brahe, Keplero hanno mostrato che i cieli sono corruttibili. Ma gli entusiasmi per la nuova astronomia si congiungono in quel testo a richiami a Pico della Mirandola, a Giovambattista della Porta, ad esaltazioni della grandezza di Paracelso e del mago Robert Fludd. Nella dura risposta a Webster, intitolata *Vindiciae Academiarum*, Seth Ward (1617-1689), che è uno dei principali esponenti della nuova scienza oxfordiana, ha buon gioco nel fargli rilevare le sue simpatie per la cabala. È vero che a Oxford si insegna Tolomeo. Ma non lo si insegna come «vero» dato che Tolomeo non si è mai «mescolato con la fisica» e si è limitato a «salvare i

fenomeni». Da questo punto di vista «non esiste al mondo libro matematico più dotto e utile del suo». Ma a Oxford non esiste studioso capace di calcolare un eclisse che non abbia ricevuto anche il sistema copernicano, perfezionato da Keplero. «Il metodo osservato in questa università consiste nell'esibire i fenomeni, nel mostrare il modo di osservarli, nell'informare poi delle varie ipotesi mediante le quali si è dato o si può dare conto di essi. Se il signor Webster propone correzioni a questo metodo e vorrà fornirle ai nostri professori, sono sicuro verrà ringraziato per questo» (Debus 1970, 29-30).

Sulla differenza fra le ipotesi e le verità dell'astronomia avremo modo di ritornare. Ma va ricordato che i negatori della realtà delle sfere celesti (fra il 1600 e il 1610) non appartengono (come è il caso di Gilbert, Brahe, Rothmann) al mondo accademico. Nei manuali di astronomia il numero dei negatori delle sfere aumenta in modo vistoso solo nel corso degli anni Venti del Seicento ed è definitivamente abbandonata solo nel corso degli anni Trenta. L'accettazione, da parte della cultura, del nuovo sistema del mondo comportava la risposta a difficili domande. Che non erano soltanto di carattere astronomico. Fa parte della grandezza di Galilei e di Keplero la loro decisa scelta copernicana. Entrambi riconobbero Copernico come il loro maestro. Entrambi dettero contributi decisivi a confermare la rivoluzione astronomica alla quale egli aveva dato inizio. Ma anche i loro contributi faticarono non poco ad aprirsi una strada. I versi della *Anatomy of the world* (1611) del grande poeta John Donne (1573-1631) sono diventati il simbolo dello smarrimento, che fu condiviso da molti, di fronte al crollo di consolidate e rassicuranti certezze:

> La nuova filosofia richiama tutto in dubbio
> l'elemento Fuoco è per intero spento,
> il Sole è perduto e la Terra; e in nessun uomo
> la mente gli insegna più dove cercarla.
> Spontaneamente gli uomini confessano
> che è consumato questo mondo,
> quando nei pianeti e nel firmamento
> cercano in tanti il nuovo. E vedono che il mondo
> è sbriciolato ancora nei suoi atomi.
> Tutto va in pezzi, ogni coerenza è scomparsa,
> ogni giusta provvidenza, ogni relazione:
> principe, suddito, padre, figlio son cose dimenticate,
> perché ogni uomo pensa d'esser riuscito, da solo,
> a essere una Fenice ...

A complicare le cose, agli occhi dei non astronomi (e anche a quelli degli astronomi) era intervenuto, accanto a quelli di Tolomeo e di Copernico, un *terzo* sistema del mondo. Un poeta francese, Maudit, in versi meno drammatici di quelli di Donne, esprimeva, nel 1681, l'incertezza che ne derivava e tentava un elementare riassunto della situazione:

Ognuno ha battezzato a suo modo l'universo.
L'uno, mediante un Cielo che muove tutti i Cieli che racchiude,
attorno alla Terra fa ruotare il Sole.
L'altro rende fisso il Cielo e con analogo giro
la Terra fa ruotare attorno al Sole.
Ora ne giunge un altro: con un ardire estremo
forgia, con i due primi, un intermedio sistema.

4. *Il sistema tychonico.*

L'autore del «sistema intermedio» era l'astronomo danese Tyge Brahe (1546-1601) che aveva latinizzato il suo nome in Tycho. Era un astronomo autodidatta che aveva studiato a Lipsia (senza seguire regolarmente i corsi dell'Università), che aveva forti interessi per l'alchimia e credeva fermamente in una affinità fra eventi celesti e fenomeni terrestri. Nel frontespizio di una delle sue opere, la *Astronomiae instauratae mechanica* si fece rappresentare curvo su un globo, con in mano un compasso e lo sguardo volto al cielo. Il motto che accompagna la figura è *suspiciendo despicio* (guardo in basso, guardando verso l'alto). L'altra illustrazione lo rappresenta con lo sguardo volto a un apparato chimico e un serpente (simbolo di Esculapio) avvinghiato al braccio. Il motto è *despiciendo suspicio* (guardando in basso, guardo verso l'alto).

Più che un filosofo naturale, Tycho fu un paziente, minuto, acutissimo osservatore. Certamente il più grande degli osservatori a occhio nudo che abbia avuto la storia dell'astronomia. Le sue prime osservazioni risalgono al 1563, quando aveva sedici anni, e furono proseguite per tutto il corso della sua vita raggiungendo una precisione che è apparsa, a molti storici dell'astronomia, quasi incredibile. Brahe si procurò molti strumenti e ne costruì molti altri, di grande raffinatezza. A differenza di molti contemporanei osservava i pianeti in modo continuo e non solo quando essi si presentavano in una congiunzione favorevole.

Quando aveva ventisei anni si verificò l'evento che decise della sua vita, lo trattenne dall'emigrare a Basilea, gli valse, da parte del re di Danimarca, la signoria dell'isola di Hveen dove egli farà costruire lo splendido castello di Uraniborg dotato di osservatori e laboratori, sede di insegnamento per molti

giovani astronomi europei. La sera dell'11 novembre 1572, ritornando verso casa, Tycho vide una nuova brillantissima stella nella costellazione di Cassiopea, in diretta opposizione al Gran Carro rispetto al Sole. Luminosa quanto Venere nel periodo del suo massimo splendore, diventerà sempre meno brillante fino a scomparire del tutto agli inizi del 1574. Quella stella, scriverà Keplero, «se non fu segno di null'altro e null'altro generò, fu tuttavia il segno e generò un grande astronomo». Nel *De stella nova* (1573) Brahe dava conto delle sue osservazioni. Se non si trattava di una cometa, se la nuova stella appariva nella stessa posizione contro la sfera delle stelle fisse, allora nei cieli immutabili si era verificato un mutamento e si potevano avanzare dubbi sul contrasto fra la immutabilità dei cieli e la mutabilità del mondo sublunare. L'osservazione delle comete del 1577 e del 1585 diede conferma a Brahe della sua ipotesi. Egli tentò di misurare la parallasse della cometa del '77: il suo valore era troppo piccolo per riferirsi alle regioni del mondo sublunare. Tutte le comete da me osservate, concludeva, «si muovono nelle regioni eteree del mondo e mai nel mondo sublunare come Aristotele e i suoi seguaci hanno voluto farci credere per tanti secoli». Se le comete erano situate al di sopra della Luna, i pianeti non potevano essere infissi nelle sfere cristalline dell'astronomia tradizionale. Secondo la mia opinione, scriverà a Keplero, «la realtà di tutte le sfere deve essere esclusa dai cieli». Le comete non seguono la legge di nessuna sfera, ma agiscono «in contraddizione con esse ». La macchina del cielo non è un «corpo duro e impenetrabile, composto di sfere reali, come fino a questo momento si è creduto da molti, ma il cielo è fluido e libero, aperto in tutte le direzioni, tale da non opporre alcun ostacolo alla libera corsa dei pianeti che è regolata, senza alcun macchinario né rotolamento di sfere reali, in accordo alla sapienza regolatrice di Dio». Le sfere «non esistono» realmente nei cieli, «vengono ammesse solo a beneficio dell'apprendimento» (Kepler 1858-1871, I, 44, 159).

Era, questa di Brahe, un'affermazione di importanza rivoluzionaria, paragonabile a quella di Copernico sulla mobilità della Terra. Sul terreno dell'astronomia (e non, come era avvenuto per Patrizi, su quello dell'immaginazione filosofica) era caduto uno dei dogmi centrali della cosmologia tradizionale: quello della incorruttibilità ed immutabilità dei cieli. Nel capitolo ottavo del *De mundi aetherei recentioribus phaenomenis liber secundus* (il titolo stesso era una sfida alla tradizione!), pubblicato a Uraniborg nel 1588, Brahe esponeva anche le linee essenziali del suo sistema del mondo. Esso traeva vita da un duplice rifiuto: dell'astronomia tolemaica e dell'astronomia copernicana. Copernico ha costruito un elegante sistema del mondo, matematicamente superiore a quello tolemaico. Ma Tycho non crede, come vuole Copernico, che al «corpo pigro ed enorme della Terra»

possa essere attribuito il movimento (anzi, tre movimenti). Se la Terra fosse in moto, afferma, una pietra lasciata cadere da una torre, non cadrebbe, come invece avviene, ai piedi della torre. Il sistema di Copernico è inoltre inaccettabile perché tra l'orbita di Saturno e le stelle fisse bisognerebbe porre uno spazio enorme, a causa della mancanza di una parallasse osservabile delle stelle. Infine, il sistema di Copernico si oppone alla Scrittura che fa più volte riferimento all'immobilità della Terra. Il nuovo sistema dovrà «accordarsi sia con la matematica sia con la fisica, evitare la censura teologica, essere in completo accordo con quanto si osserva nei cieli».

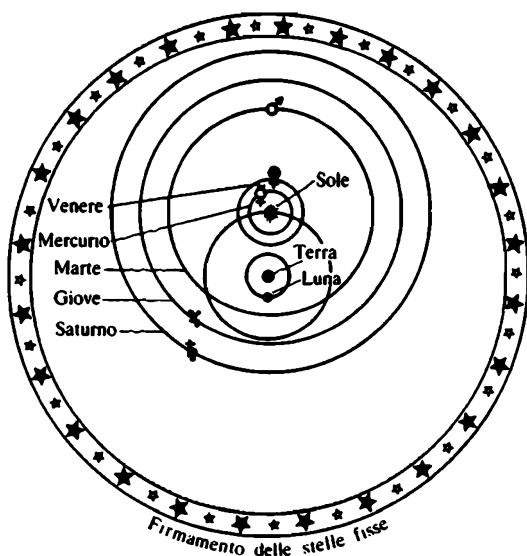



Figura 6. — Il sistema ticonico del mondo.

Nel sistema ticonico (vedi fig. 6) la Terra è immobile al centro di un universo racchiuso da una sfera stellare la cui rotazione quotidiana dà conto dei circoli giornalieri delle stelle. La Terra è anche (come nel sistema tolemaico) al centro delle orbite della Luna e del Sole. Al centro delle orbite degli altri cinque pianeti (Mercurio, Venere, Marte, Giove, Saturno) sta invece il Sole. La negazione del carattere materiale delle sfere nasce anche su questo terreno, dato che le orbite si intersecano in più punti. Epicicli, eccentrici ed equanti sono ancora necessari al funzionamento del sistema.

Dal punto di vista dei calcoli, il sistema ticonico era in tutto equivalente a

quello copernicano e ne conservava tutti i vantaggi matematici. Escludeva ogni ragione di conflitto con le Scritture e non comportava l'abbandono del principio, così fortemente radicato nel senso comune e nell'opinione dei dotti, della immobilità della Terra e della sua centralità nell'universo. Diventò un punto di convergenza per quanti non accettavano la rivoluzione copernicana e fu prediletto da molti Gesuiti. L'autorità grandissima di Brahe costituì senza dubbio un ostacolo alla diffusione del copernicanesimo. Ma i problemi che la sua grande astronomia aveva posto favorivano senza dubbio la messa in crisi e l'abbandono del sistema tolemaico.

In una lettera a Keplero, Brahe aveva manifestato «orrore» di fronte alla supposizione che i moti celesti potessero non essere circolari. In caso contrario le traiettorie degli astri «non tornerebbero perpetuamente su se stesse e sarebbero prive di eternità... sarebbero irregolari e non si presterebbero a uno studio scientifico e all'uso del calcolo» (Kepler 1858-1871, XIV, 94-96). Scrivendo a Maestlin, il 20 dicembre 1601 (l'anno stesso della morte di Brahe) Keplero dava una valutazione dell'opera di Brahe e della sua propria opera: «L'opera più importante di Tycho sono le sue osservazioni, altrettanti grossi volumi che annate impiegate in questo lavoro ... Puoi vedere in qual modo Dio dispensi i suoi doni. Nessuno può tutto. Tycho ha fatto come Ipparco, ha gettato le fondamenta dell'edificio e ha compiuto un lavoro enorme. Questo Ipparco aveva bisogno di un Tolomeo che edificasse, su quella base, le teorie degli altri cinque pianeti. Io l'ho fatto mentre egli era ancora in vita» (Kepler 1858-1871, XIV, 203 segg.).

5. *Kepler: la fisica celeste e l'armonia cosmica.*

L'astronomo che paragonava se stesso a un nuovo Tolomeo, Johann Kepler (1571-1630) (cfr. il cap. V di questo volume) nacque, da famiglia luterana, a Weil, nel Württemberg. Con il progetto di diventare un pastore, frequentò l'università protestante di Tubinga dove Maestlin insegnava astronomia presentando sia il sistema tolemaico sia quello copernicano. Nel 1594 accettò un posto di matematico degli stati di Stiria e di insegnante di matematica al seminario protestante di Graz, in Austria. La sua carica lo obbligava a fornire il calendario annuo e alla stesura di alcuni «pronostici». In uno di essi previde con successo un inverno molto freddo, rivolte contadine, la guerra con i Turchi. Non si sottrasse, in seguito, alla stesura di oroscopi alcuni dei quali, come quello di Wallenstein, sono anche ritratti di notevole penetrazione psicologica. A Graz aveva pochi allievi e molto tempo a disposizione. Scrisse nel 1595 e pubblicò nel 1596 (con l'aiuto di Maestlin) il *Mysterium cosmographicum*.

Le opere di Keplero sono un documento straordinario perché, in esse,

egli non dà soltanto conto di teorie e di osservazioni, non espone soltanto risultati, narra i motivi per i quali è pervenuto alle sue teorie, racconta i suoi tentativi, le sue incertezze, gli errori che ha compiuto. Ritiene che un'esposizione delle *ragioni* che lo hanno indotto a scrivere un libro sia essenziale alla comprensione del medesimo da parte del lettore e alla sua propria fama. Sentendo esporre il sistema di Copernico, racconta Keplero, e convinto della insufficienza del tradizionale sistema, fui preso da entusiasmo per esso al punto di difenderlo nelle dispute con i candidati alla licenza e da avviare una ricerca sulle «ragioni fisiche e metafisiche» e non meramente matematiche (come in Copernico) del moto del Sole. Il sistema copernicano è, agli occhi di Keplero, in accordo con i fenomeni celesti, è in grado di dimostrare i moti passati e di predire quelli futuri con un'esattezza maggiore di quella di Tolomeo e degli altri astronomi. Con le ipotesi tradizionali «non si finisce mai di fingere sfere», mentre Copernico «ha liberato la natura di quella onerosa e vana suppellettile» e la natura «ama la semplicità e l'unità, in essa non si trova mai nulla di ozioso e di superfluo».

Ma lo scopo principale dell'opera non è quello di difendere Copernico, bensì di dimostrare che, nella creazione del mondo e nella disposizione dei cieli, Dio «ha guardato a quei cinque corpi regolari che hanno goduto di così grande fama dai tempi di Pitagora e Platone» e che ha accordato alla loro natura il numero, la proporzione e i rapporti dei moti celesti. I cinque solidi regolari o «cosmici» ai quali fa riferimento Keplero hanno una speciale caratteristica: soltanto in essi le facce sono identiche e costituite da figure equilateri. Sono: il cubo, il tetraedro, il dodecaedro, l'icosaedro, l'ottaedro. Keplero si chiede dunque le *cause* del numero, delle dimensioni e dei moti degli orbi e ritiene che questa ricerca sia fondata sulla mirabile corrispondenza che esiste fra le tre cose immobili nell'universo (il Sole, le stelle fisse, lo spazio intermedio) e le tre persone della Trinità. La ricerca sulla possibilità che un orbe sia il doppio o il triplo o il quadruplo di un altro non dà alcun risultato: nemmeno introducendo tra un'orbita e l'altra pianeti invisibili per la loro piccolezza. I cinque solidi regolari sembrano, dopo una serie di sfortunati tentativi, una via d'uscita e ciò si configura per Keplero come una straordinaria scoperta. Alla grandezza dei cieli, che Copernico ha stabilito essere sei, corrispondono soltanto cinque figure che «fra tutte le infinite figure possibili, hanno proprietà particolari che nessun'altra figura possiede». L'orbe della Terra diventa la misura di tutti gli altri orbi. Se la sfera di Saturno viene circoscritta al cubo in cui risulta inscritta la sfera di Giove e se il tetraedro è inscritto nella sfera di Giove con la sfera di Marte inscritta in esso e così via (nell'ordine delle figure elencato sopra), allora le dimensioni relative di tutte le sfere sarebbero quelle calcolate da Copernico (vedi fig. 7). C'erano, in realtà, alcune differenze. Ma Keplero faceva

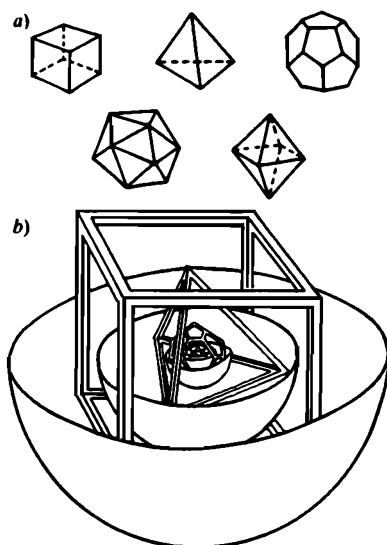



Figura 7. — L'applicazione al cosmo di Keplero dei cinque solidi regolari. La sfera di Saturno è circoscritta al cubo, mentre la sfera di Giove è inscritta in esso Il tetraedro è inscritto nella sfera di Giove e così via (riprodotto da Th. S. Kuhn, *The copernican revolution*, Cambridge [Mass.] 1957, p. 218).

affidamento sulla possibilità di calcoli più accurati e sul lavoro di Tycho Brahe.

Nel *Mysterium* Keplero non ricerca solo le leggi della struttura del cosmo, affronta anche il problema del *perché* dei moti dei pianeti e della loro velocità (che è tanto minore quanto più i pianeti sono lontani dal Sole). Ritiene che si debba necessariamente accettare una di queste due affermazioni: o le anime motrici dei singoli pianeti sono tanto più deboli quanto più distano dal Sole, oppure c'è una sola anima motrice, posta nel centro di tutti gli orbi, ossia nel Sole, che sospinge ogni corpo: con maggior forza i corpi vicini, con forza minore quelli lontani, in ragione della attenuazione della forza con la distanza. Keplero decide per la seconda ipotesi e ritiene che la forza sia proporzionale al cerchio in cui si diffonde e diminuisca con l'accrescersi della distanza. Dato che il periodo aumenta con l'accrescersi della circonferenza «la maggior distanza dal Sole agisce due volte nell'accrescere il periodo, e, inversamente, la metà dell'aumento del periodo è proporzionale all'aumento della distanza». I risultati dei calcoli non erano troppo lontani da quelli di Copernico e Keplero ha l'impressione di essersi «avvicinato alla verità». Nella sua cosmologia, il Sole è al centro dell'universo (per Copernico il

centro dell'universo non coincide con il Sole ma con il centro dell'orbita terrestre). Il Sole si configurava come la sede della vita, del moto e dell'anima del mondo. Le stelle fisse sono in quiete; i pianeti hanno un'attività secondaria di moto. Al Sole, che supera in splendore e bellezza tutte le cose compete quell'atto primo che è più nobile di tutti gli atti secondi. Immobile e fonte di movimento, il Sole è l'immagine stessa del Dio Padre. Non solo l'universo, ma l'astronomia diventavano eliocentriche. Il Sole era concepito non solo come il centro architettonico del cosmo, ma come il suo centro dinamico.

Il *Mysterium cosmographicum*, grandemente apprezzato da Maestlin, fu inviato dal giovane Keplero a Tycho Brahe. Galilei, che vide il libro, scrisse a Keplero congratulandosi per la sua adesione al copernicanesimo. Ma, molto probabilmente, non lo aveva ancora letto. Quando fu sollecitato da parte di Keplero ad uno scambio epistolare, non rispose. La sua distanza da ogni forma di misticismo lo allontanava dal tipo di scienza praticato da Keplero. La sua immagine della scienza e la sua condanna di quelle che egli qualificava come «fanciullezze» gli impedirono di rendersi conto di tutte le grandi scoperte in seguito effettuate da Keplero. L'incontro con Tycho Brahe assai più simpatetico nei confronti delle posizioni misticheggianti, ebbe invece effetti decisivi.

L'armonia e le proporzioni dell'universo, aveva scritto Brahe a Keplero, devono essere cercate *a posteriori* e non determinate *a priori*. Al di là di questa riserva di fondo, Brahe aveva una stima grandissima del lavoro svolto nel *Mysterium*. Aveva lasciato la Danimarca e si era stabilito in Boemia come matematico imperiale. Offrì a Keplero un posto di assistente. Quest'ultimo, con qualche esitazione, accettò (nel 1600) di occuparsi di elaborare una teoria dei movimenti di Marte in vista della preparazione di nuove tavole (che avrebbero dovuto sostituire le *tabulae prutenicae*). Le *tabulae rudophinae* verranno pubblicate solo nel 1627. Ma la morte di Brahe, nel 1601, aveva creato una situazione nuova. Keplero successe a Brahe nella carica di matematico imperiale ed ebbe il diritto di accedere agli appunti e agli scritti di Tycho.

Oltre ad almanacchi e pronostici, Keplero pubblica, in questi anni, *De fundamentis astrologiae certioribus* (1601); *Ad Vitelionem paralipomena* (che sono un'opera fondamentale nella storia dell'ottica, 1604); *De stella nova* (1606); *De Jesu Christi Salvatoris nostri vero anno natalitio* (1606). Nel 1606 ha anche terminato il suo capolavoro: l'*Astronomia nova seu Physica coelestis* che verrà pubblicata solo nel 1609, l'anno stesso in cui Galilei puntava il suo cannocchiale verso il cielo.

Nell'*Astronomia nova* Keplero dà conto dei settanta tentativi che ha compiuto per far rientrare i dati ottenuti da Tycho relativamente ai moti di Marte nelle varie combinazioni di circoli ricavabili dall'astronomia tolemaica

e da quella copernicana. Il disaccordo fra le previsioni e le osservazioni di Tycho era solo di 8 minuti di grado. Questo risultato sarebbe sembrato accettabile a tutti gli astronomi dell'epoca. Keplero scartò tutte le soluzioni e, disperando di giungere a una soluzione accettabile, passò a calcolare l'orbita della Terra. La velocità di quest'ultima è maggiore quando essa si avvicina al Sole, minore quando si allontana da esso. Sulla base di una premessa errata (la velocità della Terra è inversamente proporzionale alla sua distanza dal Sole) ed effettuando calcoli che contenevano non trascurabili errori, Keplero giunge a formulare quel risultato che ci è oggi noto come *seconda legge di Keplero*: in tempi uguali, la linea che congiunge con il Sole il pianeta spazza aree uguali. A differenza di quanto aveva sostenuto l'astronomia antica e lo stesso Copernico, la Terra e gli altri pianeti si muovono di un moto *realmente* e non solo *apparentemente* non uniforme.

Una semplice legge geometrica spiega questa non uniformità. La causa fisica della variazione va ricercata ancora una volta nel Sole. Accanto a Copernico e a Tycho Brahe, Keplero riconoscerà in Gilbert uno dei suoi grandi maestri. La filosofia magnetica costituisce lo strumento atto a spiegare quelle variazioni fisiche di velocità. Keplero si era esplicitamente richiamato ad un'anima presente nei corpi celesti. Ma, a differenza di Giordano Bruno e di Francesco Patrizi, non solo aveva effettuato calcoli matematici ed accurate osservazioni astronomiche, si era anche interrogato sui *modi di funzionare* di quelle anime. All'interno del suo pensiero e della sua unificazione della fisica celeste con la fisica terrestre, sono ancora operanti fondamentali categorie della fisica aristotelica. Per Keplero, in questo aristotelico, solo l'applicazione di una forza consente di spiegare la persistenza del moto. Keplero non conosce il principio d'inerzia né ha la nozione di forza centripeta. La forza che emana dal Sole non esercita una attrazione centrale: serve a promuovere il moto dei pianeti e a *mantenerli in movimento*. Anche nel testo dell'*Astronomia Nova*, là dove Keplero ha rinunciato a spiegazioni fondate sull'esistenza di una specifica anima per ogni particolare pianeta, l'attribuzione di un'anima al Sole non si configura affatto come una sorta di «concessione» ad una metafisica animistica che possa venire eliminata dal sistema. I motori propri dei pianeti sono affezioni dei corpi planetari, simili «a quell'affezione che è nel magnete, che tende verso il polo e attrae il ferro». L'intero sistema dei moti celesti è quindi governato «da facoltà meramente corporee, ossia magnetiche». C'è però un'eccezione che è indispensabile al funzionamento del sistema: «Fa eccezione solo la rotazione locale del corpo del Sole, per spiegare la quale appare necessaria la forza proveniente da un'anima». Keplero non attribuisce rotazione alla Luna. Ma il Sole, corpo centrale dell'universo, *deve* ruotare sul proprio asse e trascinare con sé l'intero corpo del mondo: «Il Sole ruota su se stesso come se fosse su una torre ed emette in

tutta l'ampiezza del mondo una *species* immateriale del suo corpo, analoga alla *species* immateriale della sua luce. Questa *species*, a causa della rotazione del corpo solare, ruota sotto forma di vortice velocissimo, che si estende in tutta l'immensità dell'universo e trasporta con sé i pianeti».

Quando ritorna a considerare l'orbita di Marte, Keplero, attraverso un'altra lunghissima serie di calcoli, giunse a calcolare la distanza tra il pianeta e il Sole nei vari punti dell'orbita. Si rende conto che il suo principale errore fu «l'aver creduto che la traiettoria del pianeta fosse un cerchio perfetto». Quell'errore pernicioso «che mi portò via tanto tempo, era sostenuto dall'autorità di tutti i filosofi e, in particolare, si accordava perfettamente con la metafisica». Rompendo con una millenaria tradizione, Keplero afferma che l'orbita del pianeta non è un cerchio, ma «a partire dall'afelio si incurva a poco a poco verso l'interno, tornando poi all'ampiezza del cerchio al perigeo: una tale traiettoria è detta ovale». Anche il passaggio dall'ovale all'ellisse fu assai complicato e degli errori di calcolo compiuti, delle vie senza uscita imboccate Keplero dà conto minuziosamente. Solo un'ellisse perfetta, con il Sole ad uno dei fuochi (e questa scoperta gli appare come l'accendersi improvviso di una luce) è in accordo con i dati dell'osservazione e con la legge delle aree. Questa sua conclusione ci è nota come la *prima legge di Keplero*. Una curva conica è sufficiente a descrivere l'orbita di ogni pianeta. L'abbandono degli eccentrici e degli epicicli, la semplificazione del sistema era ottenuta attraverso l'abbandono del dogma della circolarità. Nel momento stesso in cui Keplero «perfezionava» il sistema copernicano, lo distruggeva (Westfall 1984, 21).

La dottrina delle cause dei fenomeni celesti era stata presentata ai pochi lettori dell'*Astronomia nova* («i più poveri, scrive Keplero, furono respinti anche dal prezzo») «tra i rovi dei numeri e di tutto l'apparato astronomico». Keplero progettò un'opera che si presentasse insieme come una *summa* della nuova astronomia e un *manuale* (destinato a soppiantare quelli in uso) scritto nella forma della questione-risposta. Nel 1610 pubblicò la *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* (cfr. il successivo cap. VII) e, nel 1611, la *Dioptrice*. Nel 1612, dopo l'abdicazione di Rodolfo II, lasciò Praga e si trasferì a Linz dove rimase per quattordici anni. La guerra lo costrinse ad abbandonare il suo posto di matematico nella città austriaca. Non riuscì mai a far ritorno, come sperò sempre, in Germania. Trovò lavoro presso vari mecenati (tra i quali il Wallenstein) e morì a Ratisbona nel 1630.

I vari libri della *summa*-manuale o *Epitome astronomiae copernicanae usitata forma quaestionum et responsionum conscripta* furono pubblicati fra il 1617 e il 1621. Le scoperte astronomiche vengono qui ripresentate nel quadro del pitagorismo e neoplatonismo già teorizzato nel giovanile *Mysterium*. Luce, calore, moto, armonia dei moti sono la perfezione del

mondo e sono entità analoghe alle facoltà dell'anima. La sfera delle stelle fisse «trattiene il calore del Sole perché non si disperda e svolge rispetto al mondo la funzione di una parete o pelle o abito». In ragione del suo corpo, il Sole è la causa del moto dei pianeti. La potenza vegetativa dell'etere corrisponde alla nutrizione degli animali e delle piante, alla facoltà vitale corrisponde il calore, a quella animale il movimento, alla sensitiva la luce, alla razionale l'armonia. Un *impetus* conferito al corpo del Sole da Dio all'atto della creazione non basta a spiegarne il moto: «la sua costanza e perennità, su cui si fonda tutta la vita del mondo, si spiega più convenientemente con l'azione di un'anima».

I temi «pitagorici» si fanno ancora più evidenti negli *Harmonices mundi libri quinque* che vide la luce a Linz nel 1619. Anche in questo caso, si tratta di un progetto molto antico, dato che nel 1600 Keplero aveva scritto a Herwart di Hohenburg: «che Dio mi liberi dall'astronomia, in modo che io possa dedicare tutto il mio tempo al lavoro sulle armonie». Ai rapporti geometrici teorizzati nel *Mysterium* (alle cinque figure Keplero aggiunge più tardi i poliedri stellati) devono affiancarsi — dato che Dio non è solo geometra, ma anche musico — dei rapporti armonici. Keplero trova modo di associare ad ogni pianeta un tono o intervallo musicale. Come risulta dall'indice del libro quinto, i singoli toni o modi musicali sono espressi dai singoli pianeti; i contrappunti o armonie universali dei pianeti sono diversi l'uno dall'altro; nei pianeti sono espressi quattro tipi di voci: soprano, contralto, tenore, basso. Nel terzo capitolo di quello stesso libro, accanto ad una riesposizione delle tesi centrali del *Mysterium* si trova anche una nuova teoria: «È un fatto assolutamente certo ed esatto che la proporzione tra i tempi periodici di due pianeti scelti a piacere è esattamente come la potenza di tre mezzi della proporzione tra le loro distanze medie, e cioè fra le loro stesse orbite». È l'enunciazione di quella che chiamiamo la *terza legge di Keplero*: i quadrati dei tempi di rivoluzione di qualunque coppia di pianeti sono proporzionali ai cubi delle loro distanze medie dal Sole. Una volta stabilita l'orbita è necessariamente stabilita la velocità e viceversa. Era stata scoperta una legge che non si limitava a regolare i moti dei pianeti nelle loro singole orbite: essa stabiliva una relazione tra le velocità dei pianeti che si muovono in orbite differenti. La scoperta della cosiddetta terza legge si configura agli occhi di Keplero come una grande scoperta *metafisica*: *Gratias ago tibi, Creator Domine*. Il libro sarà letto nel presente o dai posteri. Potrà anche attendere cento anni chi lo legga: «Dio non ha forse atteso seimila anni prima che qualcuno contemplasse le sue opere?».

Keplero seguì vie assai tortuose (che solo Alexandre Koyré ha avuto la pazienza di ricostruire in modo analitico): non solo egli derivò la sua seconda legge delle aree da presupposti «errati», ma la stabilì come vera *prima* di aver

determinato il carattere ellittico delle orbite planetarie. Quelle tre leggi, attraverso le quali il nome di Keplero compare ancor oggi nei manuali di fisica, emergono da un contesto che — prendendo come punti di riferimento Descartes o Galilei — è davvero difficile qualificare come «moderno».

Tutti gli storici hanno sottolineato la straordinaria mescolanza di misticismo dei numeri e di passione per l'osservazione che è presente in Keplero. Molti hanno insistito sull'ostinata, incredibile tenacia con la quale egli cerca dati che si adattino a immaginose ipotesi metafisiche e ne costituiscano la conferma. Alcuni hannno avvicinato Keplero al neopitagorismo e alla tradizione ermetica fino a identificarlo con essi. Collocato fra Galilei e Newton, Keplero costituisce senza dubbio un'ingombrante presenza. È tuttavia possibile cercare di determinare alcune differenze. Si è già rilevato che, diversamente da Patrizi e dai maghi e filosofi naturali del tardo Rinascimento, Keplero è fortemente interessato ai *modi di funzionare* delle anime dei corpi celesti. Al di là della sua adesione fermissima alle prospettive mistiche del platonismo, la sua «modernità» è legata a due temi: 1) la ricerca delle variazioni quantitative delle misteriose forze che agiscono nello spazio e nel tempo; 2) il parziale abbandono del punto di vista animistico in favore di una prospettiva di tipo meccanico. I moti che si verificano nello spazio, la *virtus* che emana dal Sole e si diffonde attraverso gli spazi del mondo sono «cose geometriche». Quella *virtus* è sottoposta alle necessità della geometria. La macchina celeste, da questo punto di vista, «può essere paragonata non ad un organismo divino, ma piuttosto ad un meccanismo di orologeria». Tutti i suoi movimenti si compiono «grazie ad una sola forza magnetica molto semplice, così come nell'orologio tutti i moti sono causati da un semplice peso».

L'idea che il mondo *non* sia un divino organismo è ciò che davvero pone Keplero in insanabile dissidio con il pensiero magico. La riduzione delle molte anime (dei singoli pianeti) ad un'anima sola (quella del Sole), la identificazione dell'*anima* con una *forza* si configurano ai suoi stessi occhi come risultati positivi. Annotando (nel 1625) la nuova edizione del *Mysterium cosmographicum*, afferma di aver già dimostrato, nell'*Astronomia Nova*, che non esistono specifiche anime per i singoli pianeti e dichiara che, per quanto riguarda il Sole, «se sostituiamo al termine *anima* il termine *forza* abbiamo esattamente lo stesso principio che è a fondamento della mia fisica del cielo». Un tempo, scrive, «credevo fermamente che la causa motrice di un pianeta fosse un'anima». Riflettendo sul fatto che la causa motrice si indebolisce in proporzione alla distanza e che lo stesso avviene per la luce del Sole, «giunsi alla conclusione che questa forza era qualcosa di corporeo, anche se corporeo va inteso qui non in senso letterale, ma traslato, allo stesso modo in cui diciamo che il *lumen* è qualcosa di corporeo».

Il misticismo di Keplero è associato ad una convizione precisa: che la verità sia avvicinabile non mediante i simboli o i geroglifici, ma attraverso le dimostrazioni matematiche. Senza di esse, scriverà al mago Robert Fludd, «io sono cieco». Non si tratta, come per la magia, «di trovare diletto nelle cose avvolte nell'oscurità, ma di chiarirle». Il primo di questi atteggiamenti «è familiare agli alchimisti, agli ermetici, ai seguaci di Paracelso; il secondo è esclusivo dei matematici».

Era certo difficile, per i contemporanei, rilevare queste differenze, accogliere risultati scientifici presentati come divine rivelazioni, accettare di ripercorrere il tortuoso cammino descritto da Keplero, muoversi all'interno di un sistema di idee che non offriva né le ormai familiari difficoltà dei classici, né la limpida chiarezza dei testi della nuova filosofia. Galilei non solo sottolineò la differenza profondissima tra «il filosofare» di Keplero e il suo proprio, ma ritenne che alcuni pensieri di Keplero fossero «più tosto a diminutione della dottrina del Copernico che a stabilimento» (*Opere*, XVI, 162; XVI, 340). Bacone, per tanti aspetti legato alla tradizione dell'ermetismo, lo ignorò del tutto. In una lettera a Mersenne del 31 marzo 1638, Descartes lo riconosce come «il suo primo maestro in ottica», ma per il resto non lo considera degno di attenzione. Solo Alfonso Borelli (1608-1679) comprese l'importanza dell'astronomia kepleriana. Le leggi di Keplero divennero leggi «scientifiche» solo dopo che se ne servì Newton e vennero accettate dalla maggioranza degli astronomi matematici solo nel corso degli anni Sessanta del Seicento. La fortuna di Keplero continuerà ad essere caratterizzata da contrasti violenti: Hegel, nel *De orbis planetarum*, vedrà in Keplero l'eroe della vera fisica non ancora disvelata dal formalismo di eredità newtoniana; Comte esprimerà, di fronte alle tesi degli *Harmonices mundi*, l'indignazione di un seguace di Newton e di Laplace.

BIBLIOGRAFIA

Testi

T. Brahe, *Opera omnia*, a cura di J.L.E. Dreyer, Copenhagen, Libraria Gyldendaliana, 1913-1929, 15 voll.

N. Copernico, *Gesamtausgabe*, Band II, *De revolutionibus*, Munchen, 1949.

Id., *De revolutionibus orbium coelestium*, a cura di A. Koyré, Torino, Einaudi, 1975.

Id., *Opere*, a cura di F. Barone, Torino, UTET, 1979.

G. Galilei, *Le opere*, ediz. nazionale, Firenze, Barbera, 1890-1909, 20 voll.

J. KEPLER, *Gesammelte Werke*, a cura di M. Caspar, Munich, Beck, 1937 segg.
ID., *Opera omnia*, a cura di C. Frisch, Frankfurt a.M., Heyder und Zimmer, 1858-1871, 8 voll.
G. RETHICUS, *De Libris Revolutionum N. Copernici narratio prima*, Basileae, 1541.

Studi

M. BOAS, *Il Rinascimento scientifico 1450-1630*, Milano, Feltrinelli, 1973.
E.A. BURTT, *The metaphysical foundations of modern physical science*, London, Routledge and Kegan Paul, 1950.
H. BUTTERFIELD, *Le origini della scienza moderna*, Bologna, Il Mulino, 1977.
S. CAMPOREALE, *Umanesimo e teologia tra '400 e '500*, in «Memorie Domenicane», Nuova serie, 1977-1978.
B. COHEN, *La nascita di una nuova fisica*, Milano, Il Saggiatore, 1974.
ID., *Revolution in science*, Cambridge (Mass.), Harvard University Press, 1985.
A.C. CROMBIE, *Da S. Agostino a Galileo. storia della scienza dal V al XVII secolo*, Milano, Feltrinelli, 1982.
A.G. DEBUS, *Science and education in the Seventeenth century*, London, 1970.
E.J. DIJKSTERHUIS, *Il meccanicismo e l'immagine del mondo dai presocratici a Newton*, Milano, Feltrinelli, 1970.
ID., *Tycho Brahe*, New York, Dover, 1963.
P. DUHEM, *Le système du monde*, Paris, Hermann, 1914-1958, 10 voll.
E. GARIN, *Rinascite e rivoluzioni. Movimenti culturali dal XIV al XVIII secolo*, Bari, Laterza, 1975.
A.R. HALL, *La rivoluzione scientifica*, Milano, Feltrinelli, 1976.
A. KOYRÉ, *La rivoluzione astronomica· Copernico, Keplero, Borelli*, Milano, Feltrinelli, 1966.
TH. KUHN, *La rivoluzione copernicana*, Torino, Einaudi, 1972.
W. PAULI, *The influence of archetypal ideas on the scientific theories of Kepler*, New York, 1955.
S. TOULMIN e J. GOODFIELD, *The fabric of the heavens*, London, Penguin, 1963.
R.S. WESTFALL, *La rivoluzione scientifica del XVII secolo*, Bologna, Il Mulino, 1984.

VII. *Galileo Galilei* (di Paolo Rossi)

1. La giovinezza: interessi per la fisica e per le tecniche. - 2. Le scoperte astronomiche. - 3. La fede e l'autonomia della ragione. - 4. Le ipotesi e la verità. - 5. La condanna di Copernico. - 6. Le comete, il mondo oggettivo, il libro della natura. - 7. I Massimi Sistemi. - 8. La distruzione della cosmologia aristotelica. - 9. Geometrizzazione, relatività, inerzia. - 10. La teoria delle maree. - 11. La tragedia di Galilei. - 12. La forza delle astrazioni: la nuova fisica.

1. *La giovinezza: interessi per la fisica e per le tecniche.*

Galileo Galilei nacque a Pisa il 15 febbraio 1564 da Vincenzo Galilei, mercante fiorentino, maestro di canto e teorico della musica, e da Giulia Ammannati, di Pescia. Nel 1581 (la famiglia si era trasferita a Firenze nel 1574) il giovane Galileo fu iscritto allo Studio di Pisa, fra gli «scolari artisti», per seguire gli studi di medicina. Si avviò invece ben presto a studi di matematica sotto la guida di un allievo di Niccolò Tartaglia: Ostilio Ricci da Fermo. Nel 1585, senza aver conseguito alcun titolo, abbandona lo studio pisano. In quello stesso anno scrive i *Theoremata circa centrum gravitatis solidorum* che rappresentano il primo frutto dei suoi interessi per la fisica e per il metodo di Archimede. L'anno successivo pubblica il suo primo lavoro, *La bilancetta*, nel quale illustra la bilancia idrostatica che ha progettato sulla base delle indicazioni di Archimede. Lo strumento serve a dimostrare che il metodo archimedeo è in grado di risolvere il problema della corona preparata per il re Gerone da un artigiano, insieme abile e disonesto, che ha impiegato una lega di metalli invece che oro puro.

La passione per la fisica non escludeva interessi di carattere letterario. Nel 1588, all'Accademia fiorentina, Galilei tiene due lezioni *Circa la figura, sito e grandezza dell'Inferno di Dante*. In esse il problema viene affrontato da un punto di vista esclusivamente matematico. Scriverà, poco più tardi, le celebri *Considerazioni sul Tasso* e un capitolo, in terza rima, *Contro il portar la toga*,

che non è solo una satira contro l'uso accademico della toga, ma anche l'espressione di una rivolta, che non verrà mai meno nel suo animo, contro la «pedanteria» dei professori:

> Pare una gatta in una via maestra
> che sbalordita fugga le persone
> quando è caduta giù dalla finestra,
> che se ne corre via carpon carpone
> tanto che la s'imbuchi e si difenda
> perché le spiace la conversazione.

È certo il ritratto di un collega. Perché nel 1589, per intercessione di Guidobaldo del Monte, che lo aveva appoggiato presso il Granduca Ferdinando, Galilei aveva ottenuto la nomina a lettore di matematiche nello Studio di Pisa. Al periodo pisano appartengono anche i manoscritti del *De Motu* (scritti intorno al 1592) nei quali Galilei afferma contro Aristotele che tutti i corpi sono intrinsecamente pesanti e che la leggerezza è solo una proprietà relativa: il fuoco sale verso l'alto non perché possieda la qualità della leggerezza, ma perché è meno pesante dell'aria. Il problema che Galilei qui affronta non è quello della velocità come tale, ma della velocità di corpi diversi nello stesso mezzo, o dello stesso corpo in mezzi differenti, o di corpi diversi in mezzi differenti. Non intende dimostrare che tutti i corpi cadono con la stessa velocità, ma che la velocità di caduta di un grave è proporzionale alla differenza tra il suo peso specifico e la densità del mezzo attraverso il quale esso cade. Oggetti della stessa materia e densità cadrebbero nell'aria, indipendentemente dal loro peso, con la stessa velocità. Nel caso di oggetti di materia diversa e aventi lo stesso peso cadrebbe con maggiore velocità il più denso. Il moto nel vuoto (attraverso la progressiva diminuzione della densità del mezzo) diventa, a differenza di quanto ritiene Aristotele, possibile: oggetti di differenti materie cadono in esso con differenti velocità.

È questo l'inizio di un lungo cammino che condurrà Galilei al rifiuto, sempre più consapevole, dei quadri mentali dell'aristotelismo e al passaggio dalla fisica dell'impetus alla fisica matematica. Le ricerche sul moto occuperanno infatti Galilei per tutta la vita: dal periodo pisano fino ai *Discorsi e dimostrazioni intorno a due nuove scienze* (1638), scritti negli anni della vecchiaia, dopo la tragedia del secondo processo e la pubblica sconfessione della dottrina copernicana. Nel corso di cinquant'anni, Galilei elabora una serie vastissima di ricerche e affronta una quantità di problemi: l'isocronismo delle oscillazioni del pendolo; la caduta dei gravi; il moto dei proietti; la coesione; la resistenza dei solidi; la «percossa». In questo lungo periodo di tempo, egli andrà assumendo, anche relativamente a questioni di

fondo, posizioni diverse che risultano da approfondimenti, correzioni, in qualche caso da vere e proprie svolte concettuali. È tuttavia rintracciabile, in questo lungo periodo di tempo, un elemento di salda continuità. Esso è costituito dalla consapevole adesione alle impostazioni e al metodo del «divino Archimede».

Gli interessi per i problemi della tecnica, già presenti ne *La bilancetta*, appaiono evidenti anche dopo il passaggio alla cattedra di matematica dello Studio di Padova (26 settembre 1592). Fra il 1592 e il 1593 compone la *Breve istruzione all'architettura militare*, il *Trattato sulle fortificazioni*, le *Mecaniche* (che verranno pubblicate solo nel 1634 nella versione francese di Mersenne). Fa lezione sugli *Elementi* di Euclide e sull'*Almagesto* di Tolomeo. Nel 1597, ad uso degli scolari, compone il *Trattato della Sfera o Cosmografia* che è una limpida esposizione del sistema geocentrico. Ma è già su posizioni ben differenti. In una lettera di quello stesso anno, indirizzata a Keplero, scrive di essere giunto già da molti anni alla dottrina di Copernico anche se, spaventato dalla sorte del comune maestro, non ha osato finora pubblicare le sue dimostrazioni e le confutazioni degli argomenti degli avversari. Accanto al suo studio sorge un'officina nella quale vengono costruiti gli apparecchi dei quali si serve nelle sue lezioni pubbliche e private. Siamo, anche in questo caso, in presenza di un interesse che non verrà più abbandonato: non solo l'architettura militare e le fortificazioni, ma i problemi della balistica, dell'ingegneria idraulica, della canalizzazione e del sollevamento delle acque, le ricerche sulla resistenza dei materiali, la costruzione del compasso geometrico-militare, del cannocchiale, del termobaroscopio, infine una passione per l'osservazione, la misura, il disegno e gli strumenti, una infinita curiosità per gli esperimenti prodotti dalla sottigliezza dell'ingegno. Del 1606 è l'opuscolo che illustra *Le operazioni del compasso geometrico militare*. Dell'anno successivo la *Difesa contro le calunnie et imposture di Baldessar Capra* il quale aveva sostenuto, a torto, di essere l'inventore del cannocchiale.

2. *Le scoperte astronomiche.*

Il 1609, che segnò un nuovo orientamento nella vita di Galilei, è anche (come si è visto nel cap. IV) un anno di importanza decisiva nella storia della scienza. Le grandi scoperte astronomiche (il *Sidereus Nuncius* è del 1610) non solo mettevano in crisi la tradizionale immagine del mondo, ma facevano anche cadere alcune obiezioni, che a molti erano apparse decisive, contro il sistema del mondo di Niccolò Copernico. La Luna ha una *natura terrestre* e tuttavia *si muove* nei cieli: da questo punto di vista il moto della Terra non appare più un'assurdità, né, per negare il moto della Terra, si può

più far ricorso ad una differenza di nature. Giove, con i satelliti che gli ruotano attorno, sembra fornire una sorta di modello, in scala ridotta, dell'universo copernicano. Le osservazioni compiute sulle stelle fisse mostrano come esse siano ad una distanza incomparabilmente più grande di quella dei pianeti e non siano affatto, come vuole la tradizione, immediatamente dietro il cielo di Saturno. Una delle obiezioni più forti avanzate contro il sistema di Copernico era l'assenza di una parallasse osservabile delle stelle. Il fenomeno della parallasse si fonda sul cambiamento di posizione che si verifica quando lo stesso oggetto è osservato da luoghi diversi (se si osserva una matita tenendo un occhio chiuso e poi lo si apre chiudendo invece l'altro occhio, sembrerà che la matita si sia mossa). Quanto maggiore è la distanza, tanto minore risulterà lo spostamento. L'obiezione (della quale si servì anche Tycho Brahe) era: se la Terra si muove nello spazio, l'aspetto delle costellazioni dovrebbe mutare di stagione in stagione. L'impossibilità di determinare la parallasse viene ora spiegata con l'immensa distanza delle stelle (figg. 1, 2).

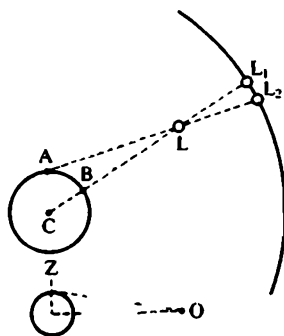



Figura 1. — La parallasse: supponiamo che la Luna L sia osservata dal punto A situato sulla superficie terrestre. La Luna è più vicina a noi delle stelle fisse e la linea che va dall'occhio dell'osservatore alla Luna può essere prolungata fino a raggiungere il firmamento in L_1. Si tracci ora una retta dal centro della Terra C alla Luna e si collochi un secondo osservatore in B. La direzione della Luna vista da quest'osservatore sarà L_2. La differenza tra la direzione della Luna vista da A e vista dal centro della Terra (o da B) è detta parallasse (*diversitas aspectus, parallaxis, commutatio*) ed è misurata dall'angolo ALC. È ovvio che la parallasse lunare varia essendo maggiore quando la Luna è all'orizzonte O e nulla quando è allo zenit Z (da E. Rosen, *Three Copernican Treatises*, Dover, New York 1959, p. 51).

Nuovi argomenti per l'abbandono del sistema tolemaico e in favore di quello copernicano vengono anche forniti dalle scoperte astronomiche che Galileo compie poco prima della sua partenza da Padova e del suo trasferimento a Firenze con il titolo di «Filosofo e matematico primario del

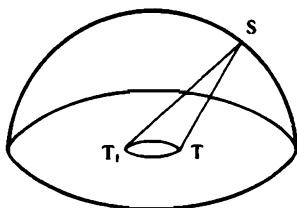



Figura 2. — In modo analogo si dice che le stelle fisse hanno una parallasse annuale. TT_1 rappresenta il moto di rivoluzione annuale della Terra attorno al Sole Se la direzione di una stella S è osservata quando la Terra è in T, e poi sei mesi più tardi quando è in T_1, vi sarà una piccola differenza tra le due direzioni. Questo spostamento nella posizione apparente di S è dovuto al moto orbitale della Terra e assomiglia allo spostamento dell'apparente posizione della Luna causato dal mutamento della posizione dell'osservatore sulla superficie terrestre. Ma la parallasse stellare fu scoperta almeno tre secoli dopo la morte di Copernico. Egli fu costretto ad assumere che tutte le stelle fisse erano enormemente distanti dalla Terra: in questo caso il loro moto annuo apparente, provocato dal moto reale della Terra, sarebbe stato così piccolo da risultare impercettibile (da E. Rosen, *op cit*, pp. 51-52). Se l'universo di Copernico era tanto grande quanto è richiesto dall'assenza di parallasse stellare — era l'obiezione di Brahe — allora le stelle dovrebbero essere incredibilmente grandi, grandi quanto l'intera orbita terrestre. Ma il telescopio non fa aumentare la grandezza delle stelle, le fa apparire come punti luminosi e non come dischi, e mostra che il diametro apparente delle stelle era stato immensamente sopravvalutato dall'osservazione ad occhio nudo (cfr. Th. Kuhn, *La rivoluzione copernicana*, Torino, Einaudi, 1976, p. 283).

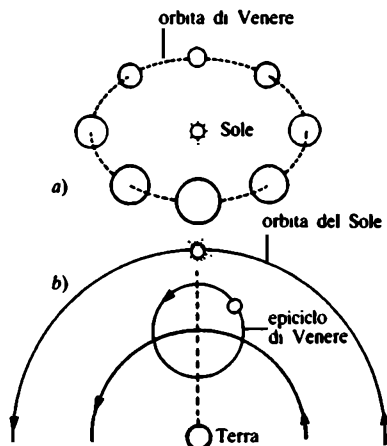



Figura 3. — In A si può vedere come l'esistenza delle fasi di Venere (osservate da Galilei) si accordi con il sistema di Copernico e come il cambiamento del diametro apparente di Venere confermi la concezione di un'orbita solare per il pianeta. In B si può vedere perché questo fenomeno sarebbe impossibile nel sistema di Tolomeo. Il centro dell'epiciclo dell'orbita di Venere si trova infatti sempre sulla linea retta che congiunge il centro della Terra a quello del Sole e ruota attorno alla Terra in un anno, esattamente come il Sole. In tale circostanza la serie completa delle fasi di Venere non potrebbe mai essere osservata (riprodotto da B. Cohen, *The birth of a new physics*, New York 1960, pp. 76, 78).

Granduca» (settembre 1611). Si tratta dell'aspetto «tricorporeo» di Saturno (il cosiddetto *anello* è inaccessibile al cannocchiale di Galilei); dell'osservazione delle macchie solari; della scoperta delle fasi di Venere. L'osservazione che Venere «va mutando le figure nell'istesso modo che fa la Luna» appare giustamente a Galilei di importanza decisiva. Essa dimostra la somiglianza tra Venere, la Luna, la Terra; consente di affermare anche che la luce di Venere è riflessa; rivela infine (ed è la cosa più importante) una realtà di fatto che non è in alcun modo inseribile nel quadro tolemaico del mondo né è spiegabile adottando quel punto di vista (cfr. fig. 3).

La «novità» delle macchie solari appare a Galilei (come egli scrive al Cesi nel maggio del 1612) «il funerale o piuttosto l'estremo e ultimo giudizio della pseudofilosofia». Il prodursi e il dissolversi delle macchie sulla superficie stessa del Sole — scriverà più tardi nella *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari* (1612) — non creano alcuna difficoltà ai «liberi ingegni» che non hanno mai creduto che il mondo posto al di sopra della sfera della Luna non sia soggetto ad alterazioni e a mutazioni (*Opere*, V, 129).

L'adesione galileiana alla dottrina copernicana risale, come si è visto, a quasi quindici anni prima delle scoperte astronômiche. Essa non nasce sul terreno dell'accettazione di un'ipotesi, ma su quello, ben diverso, dell'accoglimento di una nuova visione del mondo reale. Dopo le grandi scoperte astronomiche del 1610, Galilei abbandona ogni atteggiamento di cautela. «Abbiamo sensate e certe dimostrazioni — scrive a Giuliano de' Medici nel gennaio del 1611 — di due gran questioni state sin qui dubbie tra' maggiori ingegni del mondo» (*Opere*, XI, 12). L'una è che i pianeti sono tutti corpi opachi; l'altra che essi ruotano attorno al Sole. Ciò era stato «creduto», ma non «sensatamente provato» dai Pitagorici, da Copernico, da Keplero, dallo stesso Galilei. Keplero e gli altri copernicani potranno ora gloriarsi «di havere creduto et filosofato bene, sebbene ci è toccato e ci è per toccare ancora ad esser reputati dall'universalità dei filosofi *in libris* per poco intendenti e poco meno che stolti» (*Opere*, XI, 12).

Pochi mesi dopo la pubblicazione del *Sidereus Nuncius*, mentre rivendicava per sé, accanto al titolo di matematico, quello di filosofo, Galilei esponeva al segretario del Granduca i suoi progetti per il futuro: due libri sul sistema e la costituzione dell'universo («concetto immenso e pieno di filosofia, astronomia e geometria»): tre libri sul moto locale («scienza interamente nuova e ritrovata da me sin dai primi principi»); tre libri sulla meccanica; infine trattati sul suono, le maree, le quantità continue, il moto degli animali. La nuova fisica e la nuova astronomia non dovevano solo mostrare la verità copernicana, dovevano anche fondare una nuova scienza della natura. Ai filosofi dei libri e ai professori, alla loro «ostinazione da

vipere» Galilei contrappone ora, orgogliosamente, una sua propria filosofia e afferma «di havere studiato più anni in filosofia che mesi in matematica pura» (*Opere*, X, 353). È (come vedremo) assai significativa, da questo punto di vista, la contrapposizione, che è presente nel discorso sulle macchie solari e che verrà più volte ripresa, dei «puri astronomi» agli «astronomi filosofi».

La sicurezza di Galilei è legata anche alle vicende successive al suo trasferimento a Firenze. A Roma, dove si era recato nel 1611, aveva ricevuto accoglienze quasi trionfali: era stato chiamato a far parte dell'Accademia dei Lincei; autorevoli cardinali, gli ambienti gesuitici, lo stesso Pontefice Paolo V avevano manifestato comprensione e consenso. Nel dicembre del 1612 Galilei è pieno di fiducia e di ottimismo. A confermare la verità copernicana, scrive, «veggonsi propizi venti indirizzarsi con tante lucide scorte, che ormai poco ci resta da temere di tenebre o traversie».

Si andava invece, proprio in quel giro d'anni, addensando la tempesta. Galileo scrive lettere tutte rivolte ad un'opera di persuasione e di convinzione alle nuove verità. Le dirige ai discepoli entusiasti ed attenti, agli avversari in tono ironico e tagliente, cerca di procurarsi nuovi e più autorevoli appoggi. Il pericolo, tuttavia, non proveniva dalla pedanteria dei professori che Galilei aveva satireggiato durante il suo soggiorno a Pisa, e non proveniva nepppure dagli ambienti dell'aristotelismo. La controversia sulla verità copernicana aveva una portata culturale e «politica» enormemente ampia, tale da sfuggire all'ottimismo fiducioso e sanguigno di Galilei. In questi anni egli appare convinto della possibilità di una vittoria a breve scadenza. Vede di fronte a sé solo l'ignoranza e la presunzione di singoli. Non si rende conto né delle posizioni che andavano maturando in taluni ambienti ecclesiastici, né delle implicazioni di carattere generale che sono presenti nella sua stessa posizione. Oscilla fra un eccesso di sicurezza e una non mai spenta disposizione alla requisitoria polemica, all'artificio retorico, alla capziosità. Si lascia trascinare in una disputa della quale finisce per smarrire il senso e la portata reali.

3. *La fede e l'autonomia della ragione.*

Non erano mancati gli espliciti avvertimenti né le caute raccomandazioni: non ho trovato né filosofi né astronomi (gli scrive Paolo Gualdo) disposti a sottoscrivere le vostre opinioni; ancor meno vorranno farlo i teologi, «pensi dunque bene, prima che pubblichi questa sua opinione per vera, perché molte cose si possono dire per modo di disputa, che non è bene asseverarle per vere». In una predica tenuta nel convento fiorentino di San Matteo il giorno dei morti del 1612, il domenicano Niccolò Lorini aveva accusato di eresia i copernicani. Alla fine dell'anno seguente, a Pisa, davanti al Granduca

e alla Granduchessa madre Cristina di Lorena, Benedetto Castelli, discepolo affezionato e fedele, difende la dottrina della mobilità della Terra contro le obiezioni di Cosimo Buscaglia. La risonanza che ebbe la disputa, il timore di perdere il favore della famiglia dei Medici spinsero Galilei a un intervento diretto. La lettera al Castelli del 21 dicembre 1613 (che ebbe larga circolazione) affronta esplicitamente il problema dei rapporti fra la verità delle Scritture e la verità della scienza.

Il testo dell'*Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari* che il principe Federico Cesi aveva fatto stampare a Roma in quello stesso anno 1613, era stato sottoposto ad alcuni significativi interventi della censura. Galilei aveva scritto che la «divina Bontà» lo aveva mosso alla diffusione delle sue teorie. I censori gli fecero sostituire l'espressione con «propizi venti». A proposito della tesi della corruttibilità dei cieli, Galilei aveva scritto che la opposta tesi della incorruttibilità era opinione non solo falsa, ma «erronea e repugnante alle indubitabili verità delle Sacre Lettere, le quali ci dicono i cieli e tutto il mondo ... esser generati e dissolubili e transitori». I revisori ecclesiastici, gli aveva fatto sapere il Cesi, «havendo approvato tutto il resto, non ci vogliono questo in modo alcuno» (*Opere*, V, 238; XI, 428-429). Nel testo che, dopo vari tentativi, fu finalmente approvato, Galilei aveva dovuto eliminare ogni riferimento alla Scrittura.

I decreti della Scrittura, scrive Galilei nella lettera al Dini, sono di assoluta e inviolabile verità. Essa non può in nessun caso errare. Possono tuttavia errare i suoi interpreti: soprattutto relativamente a quelle proposizioni la cui forma dipende dalle necessità di adattamento alle capacità di comprensione del popolo ebraico. Quanto «al nudo senso delle parole», molte proposizioni hanno dunque «aspetto diverso dal vero», sono accomodate alla capacità del volgo ed è necessario che saggi interpreti ne chiariscano il senso. Natura e Scrittura procedono entrambe dal Verbo di Dio: la prima come «dettatura dello Spirito Santo», la seconda come «osservantissima esecutrice degli ordini di Dio». Ma mentre il linguaggio della Scrittura è accomodato all'intendimento degli uomini e le sue parole hanno significati diversi, la Natura è invece «inesorabile e immutabile» e non si cura che le sue ragioni e i suoi modi di operare «sieno o non sieno esposti alla capacità de gli uomini». Nelle discussioni che hanno per oggetto la Natura, la Scrittura «dovrebbe esser riserbata nell'ultimo luogo». La Natura ha in sé una coerenza e un rigore che sono assenti nella Scrittura: «non ogni detto della Scrittura è legato ad obblighi così severi come ogni effetto di Natura». Gli «effetti naturali» che l'esperienza sensibile ci pone dinanzi non possono in alcun modo «esser revocati in dubbio per luoghi della Scrittura ch'avesser nelle parole diverso sembiante». Compito dei «saggi espositori del testo sacro» (dato che Natura e Scrittura non possono mai contrariarsi) è quello di

«affaticarsi per trovare i veri sensi de' luoghi sacri» che siano in accordo con le conclusioni scientifiche accertate dal senso o dalle dimostrazioni. Inoltre, dato che le Scritture ammettono una serie di esposizioni lontane dalla lettera e dato che non siamo affatto sicuri che tutti gli interpreti siano ispirati da Dio, sarebbe prudente non permettere a nessuno di impegnare i luoghi della Scrittura per appoggiare come vere conclusioni naturali che potrebbero, in futuro, essere dimostrate false. La Scrittura tende a persuadere gli uomini di quelle verità che sono necessarie alla loro salvezza e che solo per questa via potevano essere comunicate agli uomini. Ma non è affatto necessario credere che le notizie che possono essere conseguite mediante i sensi e l'intelletto (di cui Dio ci ha dotati) ci siano fornite dalla Scrittura che, per esempio nel caso dell'astronomia, fa ad essa scarsi riferimenti in proposizioni isolate. La seconda (molto più breve) parte della lettera tende a dimostrare che le parole del testo sacro secondo le quali Dio fece fermare il Sole e prolungò la durata del giorno (Giosuè, X, 12) dietro preghiera di Giosuè, si conciliano perfettamente con il sistema copernicano e *non* invece con quello aristotelico tolemaico (*Opere*, V, 281-288).

Il pezzo di bravura con cui Galilei cercava di dividere i suoi avversari sostenendo la maggiore vicinanza della dottrina copernicana al testo sacro non eliminava certo l'esistenza di difficili domande. Se la Bibbia contiene solo proposizioni necessarie alla salvezza, che senso ha affermare che il passo di Giosuè «ci mostra manifestamente la falsità e l'impossibilità del mondano sistema aristotelico e tolemaico»? Nel momento in cui il linguaggio rigoroso della natura veniva contrapposto al linguaggio metaforico della Bibbia, i filosofi naturali non diventavano autorevoli interpreti di quel linguaggio? In quanto lettori e interpreti del libro della natura che è scritto da Dio non devono anche indicare agli interpreti della Scrittura quei «sensi» che si accordano con le verità naturali? Non finiscono allora di necessità per invadere il campo riservato ai teologi? In che senso (si chiederà Galilei nella lettera a Madama Cristina del 1615) la teologia è la «regina» delle scienze? Perché comprende dentro di sé tutto ciò che viene insegnato dalle altre scienze? Oppure perché il suo oggetto supera in dignità quello di tutte le altre scienze? La «regia preminenza» della teologia dipende, secondo Galilei, da questa seconda ragione: dal fatto che essa offre agli uomini verità che concernono «l'acquisto della divina beatitudine». Il limite di sovranità della teologia viene identificato con l'impossibilità di una violazione degli elementi costitutivi del discorso scientifico: è impossibile comandare di non vedere ciò che si vede, di non intendere ciò che si intende, di trovare il contrario di ciò che si è trovato. La teologia non deve curarsi «delle più basse e umili speculazioni delle inferiori scienze» in quanto queste ultime non concernono la beatitudine e la salvezza. Assumendo una posizione diversa, la

teologia sarebbe simile a un principe assoluto che non si accontentasse di governare, ma volesse «non essendo egli medico né architetto, che si fabbricasse e si medicasse a modo suo» (*Opere*, V, 325).

Galilei si muoveva su un terreno minato. La saldatura tra teologia e filosofia naturale, che da secoli sembrava garantire alla Chiesa la sua funzione di guida delle coscienze e della cultura, apparve a molti irrimediabilmente spezzata. Nella denuncia presentata il 7 febbrario 1615 Niccolò Lorini, che pure traduceva in un linguaggio rozzo e approssimativo le tesi copernicane e galileiane, coglieva con precisione alcuni punti: nella sua lettera al Castelli, «corrente per le mani di tutti», Galilei ha affermato che nelle controversie sugli effetti naturali «la Scrittura tenga l'ultimo luogo», che i suoi espositori errarono spesso, che la Scrittura «non si deve impicciar d'altra cosa che delli articoli concernenti la fede», che nelle cose naturali «abbia più forza l'argomento filosofico o astronomico che il sacro e il divino» (*Opere*, XIX, 297-298). Anche il Cardinale Bellarmino, nel 1615, insisterà sul fatto che le conclusioni del Concilio di Trento proibiscono di esporre le Scritture «contra il commune consenso de' Santi Padri». Tutti i Padri e tutti i commentari moderni sul Genesi, i Salmi, l'Ecclesiaste, Giosuè «convengono in esporre *ad literam* ch'il Sole è nel cielo e gira intorno alla Terra con somma velocità e che la Terra è lontanissima dal cielo e sta nel centro del mondo immobile». La Chiesa non può sopportare che si dia alle Scritture un senso «contrario alli Santi Padri et a tutti li espositori greci e latini» (*Opere*, XII, 171-172).

Galilei, come la maggioranza degli interpreti hanno sottolineato, lottava certo per la distinzione fra scienza e teologia, per la separazione fra le verità della fede e quelle ricavate dallo studio della natura. Ma non va dimenticato che Galilei si mosse, o fu costretto a muoversi, anche sul terreno, molto più difficile e scivoloso, della ricerca di una conferma, *nella* Scrittura, delle verità della nuova scienza. Abbiamo visto come, nella lettera al Castelli, fosse presente la tesi che il celebre luogo di Giosuè non si conciliasse con il sistema tolemaico. In una lettera scritta a Piero Dini il 23 marzo 1614 Galilei si cimenta con il testo del Salmo 18 che lo stesso Dini gli aveva segnalato come uno dei passi considerati «più repugnanti» al sistema copernicano (*Opere*, V, 301). «Dio pose nel Sole il suo tabernacolo...»: commentando questo testo e indicando significati «congruenti» con le parole del profeta, Galilei avanza tesi tipicamente neoplatoniche e «ficiniane». Una sostanza «spiritosissima, tenuissima e velocissima», capace di penetrare dovunque senza contrasto, ha la sua sede principale nel Sole. Di qui si diffonde per tutto l'universo e riscalda, vivifica e rende feconde tutte le creature viventi. La luce, creata da Dio nel primo giorno, e lo spirito fecondante si sono uniti e fortificati nel Sole, posto perciò al centro dell'universo, e di qui nuovamente si diffondono.

Il Sole è «un concorso nel centro del mondo del calore delle stelle» e, come fonte di vita, viene paragonato da Galilei al cuore degli animali che continuamente rigenera gli spiriti vitali (*Opere*, V, 297-305).

Offrendo una sua interpretazione del luogo di Giosuè e dei versetti del Salmo 18, Galilei intende dunque dimostrare che in quei testi sono presenti alcune verità del sistema copernicano. Nella Bibbia sarebbe racchiusa la conoscenza che il Sole è al centro dell'universo e che la rotazione che esso compie su se stesso è la causa del moto dei pianeti. Il salmista usa del sistema eliocentrico e conosce una verità fondamentale dell'astronomia moderna: non gli era occulto, scrive Galilei, che il Sole «fa raggirarsi intorno tutti i corpi mobili del mondo» (*Opere*, V, 304).

Galilei non tendeva solo, nel corso del tentativo effettuato in questi anni, a *scindere* l'interpretazione della Scrittura dalle interpretazioni tradizionali, tendeva anche a *ricondurla* a una lettura fondata sulle prospettive aperte dalla nuova scienza (Banfi 1962, 137-138). Nel momento stesso in cui fa uso di tutta la sua sottigliezza ed abilità dialettica per rintracciare *nel testo sacro* una conferma della nuova cosmologia, egli rischia di compromettere, fin dall'inizio del suo discorso, il valore della sua tesi di carattere generale di una rigorosa distinzione e separazione fra il campo della scienza e quello della fede, fra l'indagine di come «vadia il cielo» e di come «si vadia al cielo» (*Opere*, V, 319). La stessa tesi per la quale il testo sacro contiene solo verità concernenti la salvezza esce indebolita da questi suoi tentativi di farsi, anche se per poche pagine, «espositore» della Bibbia. Su questo punto la posizione di Galilei è ambigua. Egli resterà però sempre consapevole della differenza, di natura qualitativa, fra il suo «piccolo parto» di interprete dei sacri testi e il suo gigantesco lavoro di indagatore del mondo fisico: «Queste cose per me sariano dormite sempre, parlo dell'entrare nelle Scritture Sacre nelle quali non è mai entrato astronomo nessuno né filosofo naturale che stia dentro i suoi termini» (*Opere*, XII, 184).

4. *Le ipotesi e la verità.*

Vanno rilette le parole di una circolare inviata da Roberto Bellarmino agli Inquisitori provinciali il 26 luglio del 1614: «Non si straccando gli heretici... di seminar continuamente i loro errori et heresie nel campo della Christianità con tanti e tanti libri pernitiosi... è necessario che non si dormi, ma che si affatichino di estirpargli almeno in quei luoghi dove potiamo». Negli ultimi tempi, in realtà, non si era dormito molto. Nel 1592 Francesco Patrizi era stato condannato per aver sostenuto l'esistenza di un solo cielo, la rotazione della Terra, la vita e l'intelligenza degli astri, l'esistenza di uno spazio infinito (riempito dal *lumen*) al di sopra del mondo sublunare. Nell'arco di dieci

anni (durante il pontificato di Clemente VIII) erano state condannate all'indice la *Nova philosophia* dello stesso Patrizi, il *De rerum natura* di Telesio, l'opera omnia di Bruno e di Campanella, erano state effettuate le inchieste contro Giambattista della Porta, Nicolò Stigliola e Cesare Cremonini, era stato condannato a morte Francesco Pucci, imprigionato Tommaso Campanella, arso sul rogo Giordano Bruno.

La limitazione del sapere scientifico al piano delle cose naturali, il rispetto, profondissimo in Galilei, per una verità non interamente riconducibile a dimensioni umane, il riconoscimento di un loro autonomo significato alle verità della fede: tutto ciò non bastò ad impedire reazioni violente e aspre prese di posizione. Il 20 dicembre del 1614 il domenicano Tommaso Caccini, in una predica a Santa Maria Novella, qualificò come eretica l'opinione di Copernico e di coloro che pretendevano di correggere la Bibbia. Si scagliò contro «l'arte diabolica della matematica» e contro quei matematici fautori d'eresie che avrebbero dovuto essere banditi da ogni stato cristiano. Nei primi mesi del 1615, dopo che Galilei era già stato formalmente denunciato al Sant'Uffizio per affermazioni «sospette e temerarie» contenute nella lettera al Castelli, usciva a Napoli una *Lettera del R.P.M. Paolo Antonio Foscarini Carmelitano sopra l'opinione de' Pitagorici e del Copernico* nella quale si sosteneva la tesi di un perfetto accordo tra il sistema copernicano e le verità della Bibbia. La reazione del Cardinale Bellarmino a questo tentativo costituisce un documento di grande importanza. Foscarini e Galilei, afferma Bellarmino, dovranno prudentemente accontentarsi di muoversi sul piano delle ipotesi. È pienamente legittimo affermare («è benissimo detto e non ha pericolo nessuno») che, *supposto* che la Terra si muova e il Sole stia fermo, si «salvano le apparenze» o si dà conto di ciò che appare meglio che con il sistema tradizionale, ma affermare che *realmente* il Sole stia al centro del mondo e la Terra si muova «è cosa pericolosa non solo d'irritar tutti i filosofi e theologi scolastici, ma anco di nuocere alla Santa Fede con render false le Scritture Sante» (*Opere*, XII, 171).

Il gesuita Roberto Bellarmino (1542-1621), che era stato creato cardinale da Clemente VII nel 1598 e che era uno dei più colti e autorevoli personaggi della Chiesa del tempo, riprendeva qui la tesi, già presente in Simplicio, in Giovanni Filopono, in Tommaso d'Aquino, dell'astronomia come pura «matematica» e puro «calcolo», come escogitazione di ipotesi delle quali non importa dire se siano o meno «vere» e corrispondenti al mondo reale. Nei tempi moderni questa tesi era stata ripresa da Andrea Osiander nella sua anonima prefazione al *De revolutionibus* di Copernico. A queste affermazioni già si era ribellato con violenza Giordano Bruno: nella *Cena delle ceneri* (1584) aveva qualificato la prefazione di Osiander «una epistola superliminare attaccata da non so chi asino ignorante et presun-

tuoso». Copernico, aggiungeva, «la intese come la disse e con tutto suo sforzo la provò... non solo fa ufficio di mathematico che suppone, ma anco da physico che dimostra il moto della Terra» (Bruno 1958, 87-90). Non diversamente, Keplero, aveva affermato essere «falsi» i principi di Tolomeo e «veri» quelli di Copernico.

Su questo punto, Galilei è d'accordo con Bruno e con Keplero. La sua posizione è nettissima e non lascia spazio ad equivoci. Alla pura astronomia egli contrappone la filosofia, all'ipoteticismo la descrizione della realtà delle cose. La ricerca di Copernico gli appare non un mezzo per giungere a calcoli che siano conformi all'osservazione, ma come un discorso che concerne «la costituzione delle parti dell'universo *in rerum natura*» e la «vera costituzione delle parti del mondo». Copernico, afferma Galilei, ritenne il sistema tolemaico non rispondente alla realtà e ritenne «che il problema della vera costituzione fusse degno d'esser ricercato». Le conclusioni erano assai nette: «Il voler persuadere che 'l Copernico non stimasse vera la mobilità della Terra, per mio credere, non potrebbe trovar assenso se non forse appresso chi non l'avesse letto... Egli, per mio avviso, non è capace di moderazione, essendo il principalissimo punto di tutta la sua dottrina e l'universal fondamento la mobilità della Terra e stabilità del Sole: però, o bisogna dannarlo del tutto o lasciarlo nel suo essere» (*Opere*, V, 299).

5. *La condanna di Copernico.*

Nel dicembre del 1615 Galilei è a Roma e riprende a discutere, a combattere, a polemizzare. Nella lettera a Madama Cristina di Lorena ha ripreso, in forma più ampia, gli argomenti contenuti nella lettera al Castelli. Sotto forma di lettera al cardinale Alessandro Orsini scrive, nel 1616, il *Discorso sopra il flusso e il reflusso del mare* che verrà più tardi rifuso nella quarta giornata del *Dialogo sui massimi sistemi*. Ma i suoi progetti, le sue speranze, le sue illusioni verranno presto interrotti. Il 18 febbraio i teologi del Sant'Uffizio presero in esame la dottrina copernicana nella rudimentale formulazione che ad essa era stata data dal Caccini. Una prima proposizione «che il Sole sii centro del mondo, et per conseguenza immobile di moto locale» veniva dichiarata dal Sant'Uffizio «stolta et assurda in filosofia e formalmente eretica, in quanto contraddice espressamente alle sentenze della Sacra Scrittura». Una seconda proposizione «che la Terra non è al centro del mondo né immobile, ma si muova secondo sé tutta etiam di moto diurno» appariva meritare «dal punto di vista filosofico, la medesima censura della prima; quanto alla verità teologica essa è almeno erronea riguardo alla fede».

Paolo V aveva disposto che Galilei venisse *ammonito* ad abbandonare la dottrina copernicana. Nel caso di un suo rifiuto, gli sarebbe stato impartito

l'*ordine* (o *precetto*), davanti a un notaio e a testimoni, di rinunciare alla dottrina censurata e di astenersi dal trattarne. La distinzione fra *ammonizione* o *precetto* è molto importante perché su di essa si fonderanno l'accusa e la condanna del 1633. Il 26 febbraio Galilei veniva convocato dal cardinale Bellarmino. Il verbale di quella seduta, che non reca le firme dei convenuti ed ha l'aspetto di una minuta, riferisce che Galilei fu *ammonito* e che subito dopo (*successive et incontinenti*), a nome del Pontefice e dell'intera Congregazione del Sant'Uffizio, gli fu *ordinato* di «abbandonare completamente detta opinione, non accoglierla, difenderla e insegnarla in alcun modo (*quovis modo*) con parole e con scritti». Questi termini appariranno a Galilei, nelle tragiche giornate del secondo processo, «novissimi et come inauditi». Molti storici concordano nel ritenere quel verbale non rispondente alla realtà e lo attribuiscono allo zelo del Padre Commissario, particolarmente accanito nei confronti di Galilei.

Il 3 marzo, dopo la sottomissione di Galilei, usciva il decreto di condanna della Sacra Congregazione dell'Indice che sospendeva, fino a che non fossero stati corretti, i libri di Copernico e quelli del teologo Diego de Zúniga che aveva sostenuto, nel suo commento al libro di Giobbe, che il testo sacro non contraddiceva le tesi di Copernico. Lo stesso decreto condannava inoltre e proibiva l'opera del padre Foscarini, proibiva tutti i libri nei quali la dottrina di Copernico venisse sostenuta. Era così giunto a termine il processo iniziato con la denuncia del Lorini. La persona di Galilei non era stata colpita. I suoi scritti non erano stati menzionati. Nel maggio, di fronte a insinuazioni malevole e alle dicerie di una sua abiura, Galilei chiese al Bellarmino una dichiarazione. In essa si certificava che Galilei non aveva mai abiurato, né aveva ricevuto penitenze di sorta: gli era stata soltanto notificata la dichiarazione pubblicata dalla Sacra Congregazione affermante che la dottrina copernicana era contraria alle Sacre Scritture e pertanto non si poteva «né difendere né tenere».

I benpensanti, come di solito avviene in questi casi, si sentivano soddisfatti e pacificati col mondo: «Le dispute del Sig.r Galilei son risolute in fumo d'alchimia». Sono finite «le girandole del cervello» e siamo di nuovo fermi «senza volar con la terra come tante formiche sopra un pallone che andasse per aria».

6. *Le comete, il mondo oggettivo, il libro della natura.*

Nel 1623 Galilei pubblicò *Il Saggiatore*, che è uno dei grandi capolavori della letteratura barocca, un'opera scintillante di ironia e di forza polemica. Essa era nata sul terreno di una disputa con il padre Orazio Grassi, del Collegio Romano, relativa alla natura delle comete. In uno scritto intitolato

Libra astronomica et philosophica, pubblicato nel 1619, quest'ultimo aveva risposto alle tre lezioni del *Discorso sulle comete* del galileiano Mario Guiducci, Console dell'Accademia Fiorentina. Il testo del Guiducci era, in realtà, opera dello stesso Galilei. Sia nel *Discorso* sia ne *Il Saggiatore* Galilei assunse, a proposito del fenomeno delle comete, le posizioni caratteristiche dell'ormai declinante aristotelismo. Sulla base del fatto che la cometa del 1577 presentava una parallasse assai più piccola di quella della Luna, Tycho Brahe ne aveva correttamente inferito che essa si trovava al di sopra del cielo della Luna. Galilei riconosce che si possono misurare le distanze col metodo della parallasse, ma nega che questo metodo si possa applicare ad oggetti apparenti come «reflessioni di lumi, immagini e simulacri vaganti» (*Opere*, VI, 66). Egli pone le comete nelle categoria di oggetti apparenti come i fasci dei raggi solari che filtrano attraverso le nubi o si presentano quando si osservi il cadere del Sole sul mare. Le comete sono, per Galilei, *fenomeni ottici* e non *oggetti fisici*: sono la rifrazione della luce solare sulle esalazioni terrestri.

Per sostenere questa tesi, Galilei attaccò aspramente l'astronomia di Tycho Brahe che aveva interpretato le comete come corpi reali. Ritenendo che anche le comete seguissero orbite circolari attorno al Sole, Tycho si era servito dell'osservazione che esse non si muovono mai in direzione retrograda come gli altri pianeti per confermarsi nella sua opinione dell'immobilità della Terra. Come è stato giustamente scritto, Galilei sperò di cancellare le comete dal cielo, demolendo la reputazione di Tycho sulla Terra. Per questa sua offensiva contro il maggiore astronomo del suo tempo pagò un prezzo molto alto: fu costretto a interpretare la parte di un aristotelico conservatore e si inoltrò in una selva di incoerenze (Shea 1974, 117-118).

Nelle pagine del *Saggiatore* sono però presenti due fra le più celebri dottrine filosofiche di Galilei: quella relativa alla distinzione fra le qualità soggettive e quelle oggettive dei corpi; quella che fa riferimento alla struttura geometrico-matematica del gran libro della natura.

La prima di queste dottrine nuove da una serie di considerazioni attorno alla proposizione che afferma «essere il moto causa di calore». Galileo respinge, prima di tutto, l'opinione che ritiene il calore una affezione o qualità «che realmente risegga nella materia dalla quale noi sentiamo riscaldarci». Il concetto di materia o sostanza corporea implica i concetti di figura, di relazione con altri corpi, di esistenza in un tempo e in un luogo, di staticità o di movimento, di contatto o meno con un altro corpo. Ma il colore, il suono, l'odore, il sapore non sono nozioni che accompagnano necessariamente quel concetto. Se non fossimo provvisti di sensi, la ragione e l'immaginazione umana non giungerebbero mai a sospettare l'esistenza di tali proprietà. Suoni, colori, odori, sapori sono pensati come inerenti ai corpi, come qualità oggettive: sono in realtà soltanto dei «nomi». Essi «tengono

solamente lor residenza nel corpo sensitivo, sicché, rimosso l'animale, (sono) levate e annichilate tutte queste qualità». Una volta «rimosso il corpo animato e sensitivo, il calore non resta altro che un semplice vocabolo». Galilei non si limita a questo. Afferma la sua «inclinazione a credere» che ciò che in noi produce la sensazione di calore «siano una moltitudine di corpicelli minimi in tal e tal modo figurati, mossi con tanta e tanta velocità» e che il loro contatto con il nostro corpo «sentito da noi, sia l'affezione che noi chiamiamo calore». Oltre alla figura e alla moltitudine di quei corpicelli, al loro moto, alla penetrazione e al toccamento, non c'è nel fuoco altra qualità.

Il mondo reale è dunque contesto di dati quantitativi e misurabili, di spazio e di «corpicelli minimi» che si muovono nello spazio. Il sapere scientifico è in grado di distinguere ciò che nel mondo è obiettivo e reale e ciò che è invece soggettivo e relativo alla percezione dei sensi. Questa «esclusione dell'uomo» dall'universo della fisica era una cosa sola con l'assunzione di un modello meccanicistico, con l'eliminazione, dalla fisica, delle cause finali e di ogni forma di antropomorfismo. Come dirà Mersenne nella *Vérité des sciences*, fra l'universo della fisica e quello dell'esperienza sensibile si è aperto, nell'età moderna, un abisso molto più profondo di quello immaginato dalle filosofie scettiche.

Durante tutta la discussione sulle qualità primarie e secondarie, Galilei evita di ricorrere al termine *atomo*. Parla di «corpicelli minimi», «minimi ignei», «minimi del fuoco», «minimi quanti». Sono in ogni caso le parti più piccole di una sostanza determinata (il fuoco), non i componenti ultimi della materia. Al termine de *Il Saggiatore* Galileo faceva riferimento ad «atomi realmente indivisibili». I passi nei quali Galilei fa riferimento alle posizioni atomistico-democritee sono singolarmente importanti. Nella prima giornata dei *Discorsi* Galilei tornerà sull'argomento a proposito del fenomeno della coesione. Simplicio accennerà con disprezzo a «quel certo filosofo antico» consigliando Salviati di non toccare simili tasti «discordi dalla mente ben temperata e ben organizzata di Vostra Signoria, non solo religiosa e pia, ma cattolica e santa».

Il riferimento alla dottrina dei «corpicelli» contenuto nel *Saggiatore* non era sfuggito alla vigile attenzione del padre Grassi. Nella sua replica a *Il Saggiatore* pubblicata nel 1626 con il titolo *Ratio ponderum Librae et Simbellae*, egli aveva messo in rilievo la vicinanza fra le tesi di Galileo e quelle di Epicuro, negatore di Dio e della Provvidenza. La riduzione delle qualità sensibili al piano della soggettività conduce ad un aperto conflitto con il dogma dell'Eucarestia perché (ed è un'obiezione che anche Descartes dovrà fronteggiare) quando le sostanze del pane e del vino vengono transustanziate nel corpo e nel sangue di Gesù Cristo sono in esse presenti anche le apparenze esterne: il colore, l'odore, il gusto. Per Galilei si tratta

di «nomi» e, per i nomi, non occorrerebbe l'intervento miracoloso di Dio.

La seconda, celebre dottrina galileiana contenuta ne *Il Saggiatore* esprime la ferma convinzione galileiana che la natura, pur essendo «sorda e inesorabile ai nostri vani desideri», pur producendo i suoi effetti «in maniere inescogitabili da noi», rechi al suo interno un ordine ed una struttura armonica, di tipo geometrico: «la filosofia è scritta in questo grandissimo libro che continuamente ci sta aperto innanzi a gli occhi (io dico l'universo), ma non si può intender se prima non s'impara a intender la lingua, e conoscere i caratteri, ne' quali è scritto. Egli è scritto in lingua matematica, ei caratteri sono triangoli, cerchi ed altre figure geometriche, senza i quali mezi è impossibile a intenderne umanamente parola; senza questi è un aggirarsi vanamente per un oscuro laberinto» (*Opere*, VI, 232).

I caratteri in cui è scritto il libro della natura (e Galilei tornerà su questi concetti in una lettera a Fortunio Liceti del gennaio 1641) sono diversi da quelli del nostro alfabeto, e non tutti sono in grado di leggere in quel libro. Non si tratta affatto di un semplice «canone metodologico». Su questo presupposto Galilei fonda la sua certezza nella verità copernicana e soprattutto la fermissima, quasi ostinata convinzione di tutta la sua vita, che la scienza non si limita a formulare ipotesi, a formulare discorsi coerenti, a «salvare i fenomeni», ma che è in grado di dire qualcosa di vero sulla costituzione delle parti dell'universo *in rerum natura*, di rappresentare la struttura fisica del mondo. Nella lettera al Liceti, scritta un anno prima della morte, non c'è alcuna contrapposizione ai libri dei poeti dominati dalla fantasia. È esplicitamente presente (come nel passo del *Saggiatore*) l'affermazione della possibilità di una lettura che è fondata sulla conoscenza di quei particolari caratteri in cui è scritto il libro che si vuol leggere. Nella pagina de *Il Saggiatore* che segue quella contenente la celebre frase sopra citata, Galilei afferma di desiderare, con Seneca, la «vera costituzion dell'universo» e qualifica questo suo desiderio come «una domanda grande e da me molto bramata».

Queste affermazioni galileiane hanno un senso preciso. Il loro significato fu inteso assai bene da quanti, in quel secolo, considerano empia e pericolosa l'idea di una conoscenza matematica fondata sulla struttura obiettiva del mondo e capace di conseguenza di eguagliare in qualche modo la conoscenza divina. La posizione del cardinale Maffeo Barberini (1568-1644), dal 1623 papa Urbano VIII, quale risulta dal memoriale Buonamici, dai riferimenti galileiani alla «angelica dottrina... alla quale è forza quietarsi» è su questo punto assai chiara: poiché per ogni effetto naturale può darsi una spiegazione diversa da quella che a noi sembra la migliore, ogni teoria deve muoversi sul piano delle ipotesi e consapevolmente rimanere su questo piano. Nel *Dialogo*, proprio in opposizione a questa tesi, Galilei sosterrà la possibilità, per la

conoscenza matematica, di eguagliare quella divina. Con un ragionamento che appare «molto ardito» all'aristotelico Simplicio, Salviati afferma: «*extensive*, cioè quanto alla moltitudine degli intellegibili, che sono infiniti, l'intender umano è come nullo..., ma pigliando l'intendere *intensive*, in quanto cotal termine importa intensivamente, cioè perfettamente alcuna proposizione, dico che l'intelletto umano ne intende alcune così perfettamente, e ne ha così assoluta certezza, quanta se n'abbia l'istessa natura; e tali sono le scienze matematiche pure, cioè la geometria e l'aritmetica, delle quali l'intelletto divino ne sa ben infinite proposizioni di più, perché le sa tutte, ma di quelle poche intese dall'intelletto umano credo che la cognizione agguagli la divina nella certezza obiettiva» (*Opere*, VII, 128-129).

Il contrasto fra l'ipoteticismo di Urbano VIII e la posizione galileiana era espressione della forte resistenza, opposta dal pensiero tradizionale, alla rinascita di Archimede, all'idea (che a quella rinascita è saldamente collegata) di una matematica che non è una scienza astratta che esplora le relazioni di un modello della realtà fisica. L'idea che i corpi della fisica non si conformino ai canoni della geometria «tendeva a suggerire che il ragionamento matematico può essere vero solo per condizioni di impossibile semplicità» (Hall 1973, 63).

È indubbio, come è stato tante volte sottolineato, che nella «filosofia» di Galilei confluiscono temi che si richiamano ad antiche e differenti tradizioni. E non ha neppure molto senso chiedersi se Galilei fu fondamentalmente un platonico, un seguace del metodo aristotelico, un discepolo di Archimede, o un ingegnere che riusciva a generalizzare specifiche esperienze (Schmitt 1969, 128-129). Verso ciascuna di quelle tradizioni Galilei ebbe un debito profondo: la sua visione dell'universo come entità matematicamente strutturata è certo legata al platonismo; la distinzione da lui effettuata fra metodo compositivo e metodo risolutivo è certo legata all'aristotelismo; l'applicazione dell'analisi matematica ai problemi della fisica gli derivava certo da Archimede; la sua costruzione e il suo uso del cannocchiale e la sua valutazione delle arti meccaniche e dell'Arsenale dei Veneziani è certo legata alla tradizione intellettuale degli «artigiani superiori» del Rinascimento. Come, si è visto, egli non esitò a richiamarsi alla metafisica della luce dello Pseudo-Dionigi e alla tradizione ermetica e ficiniana quando, per un breve periodo, tentò di farsi espositore delle Scritture per mostrare che in esse sono contenute alcune delle verità copernicane.

È indubbio che Galilei utilizzò ciascuna di queste tradizioni. Ma non si trattò solo di una mescolanza occasionale. L'idealismo matematico, combinato con l'eredità del «divino Archimede» e con una concezione di tipo corpuscolare, era destinato ad avere, nella storia dell'Occidente, una forza esplosiva.

7. *I Massimi Sistemi.*

Quando fu eletto al soglio pontificio il cardinale Maffeo Barberini, che aveva in più occasioni manifestato simpatia e ammirazione per l'opera di Galilei, quest'ultimo si aprì a nuove speranze. Il pontificato di Urbano VIII sembrava caratterizzato da notevole tolleranza. Nel 1626, tre anni dopo la sua elezione, il nuovo Pontefice farà liberare Tommaso Campanella assegnandogli una pensione. In questo nuovo clima Galilei scrisse la *Risposta* alla confutazione del sistema copernicano scritta dal giurista ravennate Francesco Ingoli e progettò la pubblicazione di un *Dialogo sopra il flusso e il reflusso del mare*. Questo titolo apparirà più tardi a Galilei troppo audace ed impegnativo. Per ragioni di prudenza giungerà alla scelta di un titolo dall'apparenza più neutrale: *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo tolemaico e copernicano*. Fin dal titolo veniva escluso da una seria considerazione il cosiddetto «terzo sistema del mondo» di Tycho Brahe che era stato accolto con particolare favore nell'ambiente dei Gesuiti.

Nel proemio *Al discreto lettore* e nelle parole conclusive dell'opera, Galilei mostrava di aderire all'ipoteticismo di Urbano VIII: «ho presa nel discorso la parte copernicana procedendo in pura ipotesi matematica», scrive Galilei nel proemio, e prosegue affermando che la condanna pronunciata dalla Chiesa nel 1616 era nata non da ignoranza scientifica ma dalle ragioni della pietà e della religione. Per tali ragioni è stata asserita «la fermezza della Terra» e la tesi contraria è stata identificata con un «capriccio matematico». La argomentazione capziosa, la cautela del proemio, il riferimento, nella conclusione alla «angelica dottrina» non saranno sufficienti ad evitare a Galilei la tragedia della sconfitta e dell'umiliazione. Il tono del *Dialogo* è in realtà assai lontano da questi atteggiamenti di diplomatica cautela.

Il colloquio si svolge a Venezia nel palazzo del patrizio veneziano Giovan Francesco Sagredo (1571-1620) che impersona la parte dello spirito libero e spregiudicato, disposto ad accogliere il nuovo, pronto all'entusiasmo e all'ironia. Il secondo personaggio è il fiorentino Filippo Salviati (1583-1614) che ha la parte del convinto copernicano e che appare come uno scienziato calmo e misurato, che unisce alla saldezza delle convinzioni la disposizione al dialogo pacato e la pazienza nell'argomentare. Il terzo interlocutore è il fittizio Simplicio, l'aristotelico difensore del sapere costituito, non ingenuo né sprovveduto, talvolta borioso, ma legato in ogni caso alla venerazione per l'autorità, alla difesa di un ordine che gli appare non modificabile e gli fa considerare pericolosa ogni tesi che da quell'ordine si discosti: «questo modo di filosofare tende alla sovversione di tutta la filosofia naturale ed a disordinare e mettere in conquasso il cielo, la terra e tutto l'universo». Salviati

rappresenta anche il pubblico al quale il *Dialogo* si rivolge. Scritta in volgare, l'opera non è certo indirizzata a persuadere i «professori» raffigurati da Simplicio. Il pubblico che Galilei vuol convincere è quello delle corti, della borghesia e del clero, dei nuovi ceti intellettuali. Di qui il tono in apparenza leggero della conversazione, le continue digressioni, il disordine apparente del dibattito, l'alternarsi di pacati discorsi a critiche taglienti. Delle quattro giornate che compongono il *Dialogo*, la prima è rivolta alla distruzione della cosmologia aristotelica, la seconda e la terza rispettivamente al moto diurno e annuale della Terra, la quarta alla *prova fisica* del moto terrestre che Galilei ritiene di aver raggiunto con la teoria delle maree.

Il *Dialogo* non è un libro di astronomia nel senso che non espone un sistema planetario. Tutto rivolto a dimostrare la verità della *cosmologia* copernicana ed a chiarire le ragioni che rendono insostenibile la *cosmologia* e la *fisica* aristotelica, esso non affronta i problemi dei moti dei pianeti e di una loro spiegazione. Del sistema copernicano viene offerta una rappresentazione semplificata, priva di eccentrici e di epicicli. A differenza di Copernico, Galilei fa coincidere il centro delle orbite circolari con il Sole e non si occupa di dar ragione delle osservazioni sul moto dei pianeti. Come è stato detto giustamente, Galilei aveva molta più fiducia nel suo principio di meccanica per il quale i corpi hanno la tendenza a perseverare in moto circolare uniforme che nella accuratezza di quelle misurazioni alle quali, in quegli stessi anni, si era dedicato con inesauribile pazienza Keplero. A questo atteggiamento è anche da ricondurre la nessuna considerazione di Galilei per i problemi della cinematica planetaria risolti da Keplero (la teoria ellittica era stata annunciata nell'*Astronomia Nova* del 1609).

Alla insostenibilità della «fabbrica del mondo» aristotelica è dedicata la prima giornata. Quel mondo non è un *uni-verso*, ha una *struttura duplice*, è fondato sulla divisione fra l'incorruttibile mondo celeste e il mondo degli elementi, soggetto al mutamento e alla corruzione. Aristotele stesso ha affermato che le testimonianze dei sensi vanno anteposte ad ogni discorso. Per questo, obietta Salviati a Simplicio, filosoferete più aristotelicamente dicendo che il cielo è alterabile perché così mi mostrano i sensi, che se direte che il cielo è alterabile perché così ha «discorso» Aristotele. Quella «lontananza dai sensi» che rendeva impossibile l'osservazione delle cose celesti è stata vinta dal cannocchiale. Ma non sono soltanto le montagne sulla Luna che costringono ad abbandonare l'immagine tradizionale dell'universo. Essa, in apparenza organica e stabile, mostra al suo interno falle e contraddizioni: muove per esempio dalla perfezione dei moti circolari per affermare la perfezione dei corpi celesti e si serve poi di quest'ultima nozione per affermare la perfezione di quei moti. Gli attributi di generabile e ingenerabile, alterabile e inalterabile, divisibile e indivisibile «convengono a

tutti i corpi mondani, cioè tanto ai celesti quanto agli elementari». Questa espressione è molto importante: afferma che il cielo e la Terra appartengono allo stesso sistema cosmico e che esiste *una sola fisica*, una sola scienza del moto valida e per il mondo celeste e per il mondo terrestre. La distruzione della cosmologia di Aristotele comporta necessariamente una distruzione della sua fisica.

8. *La distruzione della cosmologia aristotelica.*

Ciò appare particolarmente evidente nella seconda giornata, che è tutta dedicata ad una minuziosa, paziente confutazione di tutti i principali argomenti, antichi e moderni, solitamente addotti contro il moto della Terra: una pietra lasciata cadere dall'alto di una torre non dovrebbe toccare il suolo al piede della perpendicolare, ma in un punto lievemente spostato verso Occidente; le palle di un cannone sparate verso Occidente dovrebbero avere una gittata più lunga di quelle sparate verso Oriente; se correndo a cavallo si sente l'aria che ci sferza il viso, dovremmo sempre avvertire (concesso che la Terra si muova) un vento impetuoso proveniente da Oriente; le case e gli alberi posti sulla superficie della Terra dovrebbero venir sradicati e gettati lontano dalla forza centrifuga provocata dal moto terrestre. Come afferma Galilei in una nota privata «è meraviglia che altri possa orinare, correndo noi così velocemente dietro all'orina; o almanco, ci dovremmo orinare giù per le ginocchia» (III, 1, 255).

In una nave ferma, argomenta Simplicio servendosi di una tesi della quale si era servito anche Tycho Brahe, se si lascia cadere una pietra dall'alto dell'albero, la pietra scende a perpendicolo. Invece, in una nave in movimento, la pietra cade secondo una linea obliqua, lontano dalla base dell'albero, verso la poppa della nave. Lo stesso fenomeno, ammesso che la Terra si muova velocemente nello spazio, dovrebbe verificarsi lasciando cadere una pietra da una torre. Su un punto Simplicio ha inconsapevolmente mentito: l'esperienza sulla nave non è mai stata compiuta. L'atteggiamento assunto da Galilei è molto significativo: chiunque farà quell'esperienza troverà accadere il contrario di ciò che Simplicio ha affermato. Ma compiere quell'esperienza non è in realtà necessario: «anche senza esperienza l'effetto seguirà... perché così è necessario che segua». Agli argomenti anticopernicani Galilei contrappone, per bocca di Salviati e di Sagredo, il principio della relatività dei movimenti. I moti celesti esistono solo per un osservatore terrestre e non è affatto assurdo attribuire alla Terra un moto diurno di rotazione. Poiché il movimento produce una variazione nelle apparenze, tale variazione ha luogo nello stesso modo sia che si assuma la mobilità della Terra e l'immobilità del Sole oppure la tesi contraria. Qualunque moto venga

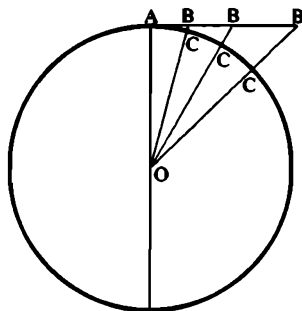
attribuito alla Terra è necessario che a noi «come abitatori di quella ed in conseguenza partecipi del medesimo ci resti del tutto impercettibile come s'e' non fusse». L'esempio addotto da Salviati come «ultimo sigillo» della vanità di tutti gli argomenti contro il moto terrestre ricavati dall'esperienza quotidiana è rimasto giustamente assai celebre: in una stanza posta sottocoperta in una nave, se ci sono mosche e farfalle e un vaso d'acqua con dentro dei pesci e un secchiello da cui cade goccia a goccia acqua dentro un altro vaso dalla bocca piccola e se la nave si muove a qualunque velocità «pur che il moto sia uniforme e non fluttuante in qua e in là, voi non riconoscerete una minima mutazione in tutti li nominati effetti, né da alcuno di quelli potrete comprendere se la nave cammina o pure sta ferma».

L'affermazione della relatività dei movimenti ha conseguenze di grande rilievo. Nella meccanica degli aristotelici si dà un legame necessario fra il movimento e l'essenza dei corpi. In quella prospettiva non solo si può stabilire quali corpi sono necessariamente mobili e quali immobili, si può anche spiegare perché non tutte le forme del movimento convengono a tutti i corpi. Nella prospettiva aperta da Galilei quiete e movimento non hanno nulla a che fare con la natura dei corpi, non ci sono più corpi di per sé mobili o immobili e non si può decidere a priori, di fronte al movimento, quali corpi si muovono e quali sono immobili. Nella fisica degli aristotelici la localizzazione delle cose non è indifferente né per le cose né per l'universo. Il movimento si configura come *moto* se avviene nello spazio, come *alterazione* se concerne le qualità, come *generatio* e *interitus* se riguarda l'essere. Il moto non è uno *stato*, ma un *divenire* e un *processo*. Attraverso quel processo le cose si costituiscono, si attualizzano, si compiono. Un corpo in moto non muta solo nella sua relazione con altri corpi: è esso stesso soggetto ad un mutamento. Nella fisica galileiana l'idea di moto di un corpo viene separata da quella di un mutamento che affetta lo stesso corpo. È la fine della concezione (che è comune alla fisica aristotelica e alla teoria medioevale dell'*impetus*) di movimento che ha bisogno di un *motore* che lo produca e che lo *conservi in moto* durante il movimento. Quiete e movimento sono entrambi due *stati persistenti* dei corpi. In assenza di resistenze esterne, per arrestare un corpo in moto è necessaria una forza. La forza produce non il moto, ma l'accelerazione. Attraverso il capovolgimento di quadri mentali consolidati, Galilei ha aperto la strada che condurrà alla formulazione del principio di inerzia.

9. *Geometrizzazione, relatività, inerzia.*

Lo spazio della fisica galileiana è uno spazio geometrico nel quale tutti i luoghi sono i luoghi naturali di ogni tipo di corpo e nel quale tutte le cose

sono allo stesso livello di essere. La identificazione dello spazio reale con lo spazio geometrico è una delle grandi conquiste di Galilei anche se quella geometrizzazione viene compiuta sia in termini di cerchi sia di linee rette. Delle difficoltà connesse a questo tipo di geometrizzazione offre una chiara illustrazione la confutazione dell'argomento di Simplicio secondo il quale case e alberi verrebbero strappati via dalla rotazione della Terra: «qual tenacità di calcine o di smalti riterrebbe i sassi, le fabbriche e le città intere?» (*Opere*, VII, 158). Era un'obiezione forte, confortata dall'esempio familiare dei pezzi di creta che schizzano via dal tornio del vasaio.

Galilei elabora una risposta che tende a dimostrare che una forza centrifuga non è in grado di far schizzare un oggetto fuori da un moto circolare uniforme ove esista una forza contraria, anche debole, diretta verso il centro. Via via che la tangente si approssima alla circonferenza, il rapporto fra la lunghezza della tangente e quella della secante diviene sempre maggiore (v. figura). La forza che agisce lungo la tangente AB non riesce a muovere il

corpo perché basta a trattenerlo la piccola forza della secante BC. In realtà la forza centrifuga aumenta col quadrato della velocità e la Terra non si muove con una velocità sufficiente a lanciare nello spazio gli oggetti che sono su di essa. Né una piccola forza basta a trattenere un sasso all'interno di una fionda. Il modello, al quale fa ricorso Sagredo, di una piccola ruota «che tanto lentamente si girasse, che in ventiquattr'ore desse una sola rivolta» (*Opere*, VII, 244) è anch'esso errato perché, a velocità angolare costante, la forza centrifuga aumenta con l'aumentare del raggio.

Huygens e Newton, mezzo secolo più tardi, saranno in grado di calcolare la forza centrifuga prodotta dalla rotazione terrestre e di confrontarla con la forza di gravità. Non ha alcun senso rimproverare Galilei di non essere stato Newton. Ha invece un senso preciso tentare di rendersi conto della radice teorica di alcuni dei suoi «errori». Molte delle difficoltà che emergono dai

testi sono collegate alla concezione galileiana dell'inerzia come *inerzia circolare*. Come ha scritto A.R. Hall commentando questo testo, per Galilei «se un corpo in moto non tende a deviare dalla linea retta, la sua tendenza a deviare dal moto circolare dovrebbe diminuire quanto più l'arco si approssima a una retta» (Hall 1973, 45).

Quel principio che è noto nei manuali come il principio della relatività galileiana (in base alle osservazioni meccaniche compiute all'interno di un sistema non si può decidere se il sistema stesso sia in quiete o in moto *rettilineo uniforme*) non corrisponde a quello effettivamente formulato da Galilei che intendeva mostrare mediante quella sua dottrina l'impossibilità, per un osservatore collocato sulla Terra, di percepire il moto di rotazione della Terra medesima. Galilei enuncia una dottrina «più larga», secondo la quale un moto «non fluttuante in qua e in là» comune a tutti i corpi che formano un determinato sistema non esercita alcuna influenza sul comportamento reciproco di quei corpi e di conseguenza non può mai essere dimostrato all'interno del sistema. Il moto «non fluttuante in qua e in là», nell'esempio galileiano della nave, vuol dire moto retto o diritto o procedente lungo il medesimo meridiano terrestre, ed è una forzatura tradurre «non fluttuante» con «rettilineo» (che è termine altrove e più volte impiegato da Galilei). La differenza non è lieve, perché il principio classico di relatività implica il concetto di un *moto rettilineo uniforme* e l'accettazione del principio di inerzia (per il quale ogni corpo persevera nel suo stato di quiete o di moto rettilineo uniforme finché non intervenga una forza a modificare tale stato).

Questo principio, che è alle radici della dinamica moderna, non fu mai formulato da Galilei proprio a causa dell'azione esercitata sulla sua fisica dalle sue convinzioni cosmologiche. Nel *Dialogo* Galilei immagina un piano orizzontale, una superficie «né acclive né declive», sul quale il mobile verrebbe ad essere indifferente «tra la propensione e la resistenza al moto». Una volta che «gli fusse dato impeto», il movimento durerebbe per tutta la lunghezza del piano e «se tale spazio fusse interminato, il moto in esso sarebbe parimenti senza termine, cioè perpetuo». La superficie di cui qui parla Galilei non è un piano orizzontale tangente alla superficie terrestre, è invece un piano «che in tutte le sue parti sia egualmente distante dal centro della Terra». Egli parla di una superficie sferica: «Una superficie che dovesse essere non declive e non acclive, bisognerebbe che in tutte le sue parti fosse egualmente distante dal centro. Ma di tali superfici ve n'è egli alcuna al mondo?... ècci quella del nostro globo terrestre, se però ella fusse ben pulita».

Sulle ragioni che spingono Galilei in questa direzione risultano illuminanti quelle pagine della prima giornata nelle quali Galilei mantiene in piedi

la distinzione aristotelica fra moti naturali e innaturali e afferma il carattere *naturale* del moto circolare e la *impossibilità* di un moto rettilineo costante: «essendo il moto retto di sua natura infinito, perché infinita e interminata è la linea retta, è impossibile che mobile alcuno abbia da natura principio di muoversi per linea retta, cioè verso dove è impossibile di arrivare, non vi essendo termine prefinito». Il moto rettilineo potrebbe essere attribuito «favoleggiando» ai corpi che si muovevano nel primo caos, quando l'universo era disordinato. Quei moti rettilinei, che hanno la caratteristica di disordinare i corpi ordinati, sono anche «acconci a ben ordinare i pravamente disposti». Il moto retto può servire «a condurre le materie per fabricar l'opera, ma, fabbricata ch'ell'è, (essa deve) o restare immobile, o, se mobile, muoversi solo circolarmente». Dopo l'ottima distribuzione e la perfetta distribuzione delle parti che costituiscono l'ordine del mondo, è impossibile che resti nei corpi «naturale inclinazione di più muoversi di moto retto, dal quale ora solo ne seguirebbe il rimuoversi dal proprio e natural luogo, cioè il disordinarsi». Possiamo così «figurarci», con Platone, che il corpo dei pianeti sia stato fatto dapprima muovere di moto retto e accelerato e che in seguito, una volta raggiunto un certo grado di velocità, quel moto sia stato convertito in moto circolare «del quale poi la velocità convien essere uniforme».

Non si tratta di concessioni di tipo letterario alla mitologia platonica. Lo stesso argomento viene ripreso, con maggiore ampiezza, nel corso del dialogo, quando Salviati argomenta sulle caratteristiche del moto circolare: «questo essendo un movimento che fa che il mobile sempre si parte e sempre arriva al termine, può primieramente esso solo essere uniforme». L'accelerazione deriva dall'inclinazione del mobile verso il termine del moto, il ritardamento dalla repugnanza ad allontanarsi da quel termine. Invece, nel moto circolare, il mobile «sempre si parte da un termine naturale, e sempre si muove verso il medesimo, adunque in lui la repugnanza e l'inclinazione sono sempre di uguali forze, dalla quale egualità ne risulta una non ritardata né accelerata velocità, cioè l'uniformità del moto». La «continuazion perpetua» che in una «linea interminata non si può naturalmente ritrovare», deriva da questa uniformità e dal fatto che il moto circolare è «interminato». La conclusione riassume con chiarezza la posizione di Galilei: solo il moto circolare conviene per natura ai corpi naturali che costituiscono l'universo ordinato; il moto rettilineo è stato assegnato dalla natura «ai suoi corpi e parti di essi, qualunque volta si ritrovassero fuori de' luoghi loro, costituite in prava disposizione».

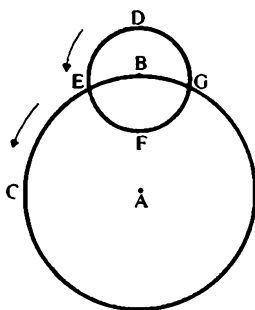
Il moto rettilineo infinito è impossibile per natura, perché la natura «non muove dove è impossibile di arrivare». Questa frase, letterariamente così seducente, esprime uno dei maggiori ostacoli che il copernicano Galilei non

riuscì a superare. Il moto in circolo resta per lui il moto per eccellenza, quello che non richiede spiegazioni (dalla nuova fisica il moto circolare dovrà essere spiegato proprio con il ricorso ad una forza non inerziale). La unificazione della fisica e dell'astronomia, che è la grande imperitura conquista di Galilei, avveniva sulla base del concetto di *inerzialità dei moti circolari*. Sulla sua grande indagine fisica continuava ad esercitare un peso decisivo quella cosmologia che si richiamava, da millenni, ai perfettissimi moti delle sfere celesti.

Anche se è difficile leggere Galilei senza «vedere» le implicazioni o le possibilità newtoniane presenti nel suo discorso, è necessario non cadere nella fallacia di attribuire a ciò che fu pensato *prima* le implicazioni che emersero *poi*. Il principio di inerzia, così come risulta formulato nella prima legge newtoniana del moto, ebbe una lunga gestazione ed è l'elaborazione, da parte di Descartes e di Newton, di una grande e rivoluzionaria idea galileiana. Come ha scritto William Shea, per passare dai concetti di Galilei alla prima legge di Newton l'inerzia dovrà essere: 1) riconosciuta come una legge fondamentale di natura; 2) considerata come implicante la rettilinearità; 3) generalizzata dal moto sulla Terra ad ogni moto che avvenga in uno spazio vuoto; 4) associata con la massa come quantità di materia. I primi tre passi verranno compiuti da Cartesio, il quarto solo da Newton (Shea 1974, 9).

10. *La teoria delle maree.*

Dal trattatello del 1616 sopra il flusso e il riflusso del mare al *Dialogo sui massimi sistemi*, per quasi vent'anni, Galilei vide nel moto delle maree e nella sua spiegazione di quel moto una *prova fisica* decisiva e difficilmente confutabile della verità copernicana. Arricchì di nuove osservazioni la sua dottrina, la espose ad amici ed avversari, ricercò dati che potessero suffragarla, pensò ad essa come al nucleo portante del *Dialogo* tanto da progettare, come si è visto, un titolo che facesse riferimento al flusso anziché ai massimi sistemi. La spiegazione galileiana (che nella quarta giornata del *Dialogo* è arricchita dalla considerazione delle variazioni annuali e mensili delle maree) assume come causa del flusso e del reflusso il duplice movimento della Terra: la rotazione diurna dell'asse terrestre da Occidente verso Oriente e la rivoluzione annua della Terra attorno al Sole, procedente anch'essa da Occidente verso Oriente. La *combinazione di questi due moti*, per Galilei, fa sì che ogni punto della superficie terrestre si muova di «moto progressivo non uniforme» e «cangi di velocità con accelerarsi talvolta e talaltra ritardarsi». Tutte le parti della Terra si muovono quindi «di moto notabilmente difforme» benché nessun movimento non regolare e non uniforme sia stato assegnato alla Terra. Il modello che Galilei introduce è

familiare agli astronomi del suo tempo. BC è l'orbita della rivoluzione annua della Terra attorno al Sole. Il cerchio DEFG è la Terra. Il centro della Terra B percorre la circonferenza BC da B verso C. La Terra ruota su se stessa attorno al suo centro B in 24 ore nell'ordine DEFG. La composizione di questi due moti, ciascuno dei quali è uniforme, genera per ogni parte della Terra un moto difforme. Il moto di tutto il globo e di ciascuna delle sue parti, conclude Galilei, «sarebbe equabile ed uniforme quando elle si muovessero d'un moto solo, o fusse il semplice annuo o fusse il solo diurno, così è necessario che mescolandosi tali due moti insieme, ne risultino per le parti di esso globo movimenti difformi, ora accelerati ed ora ritardati, mediante gli additamenti o suttrazioni della conversion diurna alla circolazione annua» (*Opere*, VII, 453).

È stato più volte sottolineato che la «falsità» della spiegazione galileiana (per la quale le maree dovrebbero verificarsi solo ogni 24 ore) non è relativa agli ulteriori sviluppi o progressi della scienza. Quella spiegazione è difficilmente conciliabile con i risultati che lo stesso Galilei ha acquisito alla fisica e all'astronomia. Dopo aver introdotto nella fisica il principio classico della relatività, Galilei (come ha notato Ernst Mach) integra illecitamente due diversi sistemi di riferimento. Tutta la seconda giornata del *Dialogo* tende a provare che su una Terra in movimento tutto accade come su una Terra in quiete. Perché solo gli Oceani risentirebbero delle variazioni di velocità della superficie terrestre? e non tutti i corpi non rigidamente legati alla Terra? La Terra, mossa da un moto diurno, non si configura più, nella quarta giornata, come un sistema inerziale (Clavelin 1968, 480).

Galilei ricerca una soluzione al problema delle maree esclusivamente in termini di movimenti e di composizione dei movimenti, rifiutando ogni dottrina degli «influssi» lunari e muovendosi sul piano del più intransigente meccanicismo. La situazione ha qualcosa di paradossale: in base ad una forte

avversione alla dottrina degli influssi e delle qualità occulte, Galilei è indotto a respingere come priva di significato ogni teoria delle maree che faccia in qualche modo riferimento alla «attrazione» fra la massa acquosa degli Oceani e la Luna. Quella dottrina non è una ipotesi alternativa ad altre possibili ipotesi, non è né incoerente né falsificabile da osservazioni: viene semplicemente «scartata» come manifestazione di una mentalità magica. Non vale la pena di spendere parole per confutare simili leggerezze, afferma Galilei per bocca di Sagredo. Che il Sole o la Luna entrino in qualche modo nella produzione delle maree è cosa «che totalmente repugna al mio intelletto... il quale non può arrecarsi a sottoscrivere... a predominii per qualità occulte ed a simili vane immaginazioni». Galilei esprime anche la sua alta meraviglia per il fatto che un uomo come Keplero, di «ingegno libero ed acuto», che si era reso conto della verità copernicana «ed aveva in mano i moti attribuiti alla Terra», abbia invece inspiegabilmente «dato orecchio ed assenso a predominii della Luna sopra l'acqua ed a proprietà occulte, e simil fanciullezze» (*Opere*, VII, 470, 486).

11. *La tragedia di Galilei.*

Con la polemica de *Il Saggiatore* Galilei si era definitivamente alienato la simpatia degli ambienti gesuitici. I nemici di Galilei non dovettero faticare molto a convincere Urbano VIII che il riferimento alla «angelica dottrina» (secondo la quale di ogni effetto naturale può darsi una spiegazione diversa di quella che ci appare la migliore e dobbiamo di conseguenza muoverci solo sul piano delle ipotesi) messa nel *Dialogo* in bocca a Simplicio indicava la precisa volontà da parte di Galilei di farsi beffe dell'autorità del Pontefice e di screditarne il prestigio. L'Inquisitore di Firenze dette ordine di sospendere la diffusione dell'opera e il primo ottobre del 1632 fu intimato a Galilei di trasferirsi a Roma mettendosi a disposizione del Commissario Generale del Sant'Uffizio. Galilei riuscì a rinviare la partenza fino al gennaio dell'anno seguente. Minacciato di essere condotto a Roma «legato anco con i ferri», si mise in viaggio il 20 gennaio. Dopo una lunga sosta a Ponte a Centina, a causa della quarantena resa necessaria dalla peste, giunse a Roma il 13 febbraio. Il 12 aprile, fisicamente e moralmente prostrato, Galilei si presentò al Sant'Uffizio. L'accusa non era quella di aver fatto pubblicare il *Dialogo*, ma di aver estorto fraudolentemente l'*imprimatur* senza far presente a chi doveva concederlo l'esistenza del *precetto* del 1616 che vietava di insegnare e difendere *quovis modo* la dottrina copernicana. Durante gli interrogatori, Galilei si richiama alla *notifica* del Bellarmino e al documento che lo stesso Bellarmino gli aveva successivamente rilasciato; afferma di non ricordare che gli sia stato intimato alcun *precetto* davanti a testimoni; conclude affermando

che il *Dialogo* aveva in realtà lo scopo di dimostrare la non validità e la inconcludenza delle «ragioni» di Copernico. Quest'ultima frase, dettata dalla paura, mise Galilei nelle mani dei giudici, gli tolse ogni reale possibilità di difesa. Ai consultori dell'Inquisizione fu facile mostrare che egli cercava di ingannare i suoi giudici: «non solo arma l'opinione copernicana di argomenti nuovi, mai proposti da alcun oltramontano, ma lo fa in italiano, lingua... la più indicata per trascinare dalla sua il vulgo ignorante fra cui l'errore fa più facilmente presa». Galilei ha inoltre preteso di uscire dai confini stabiliti per i matematici: «L'autore sostiene di aver discusso un'ipotesi matematica, ma le conferisce una realtà fisica, ciò che i matematici non faranno mai».

Nel memoriale scritto, preparato in sua difesa, Galilei riaffermò con energia (10 maggio) che i termini presenti nel verbale del 1616 gli erano giunti «novissimi e come inauditi». Dopo un mese e dopo un nuovo interrogatorio fu emanata la sentenza. Nello stesso giorno, il 22 giugno 1633, Galilei in abito di penitenza e in ginocchio davanti ai cardinali della Congregazione, pronuncia una pubblica abiura: «con cuore sincero e fede non finta abiuro, maledico e detesto li suddetti errori et heresie... e giuro che per l'avvenire non dirò mai più né asserirò, in voce o in scritto, cose tali per le quali si possa haver di me simil sospitione, ma se conoscerò alcun heretico o che sia sospetto d'heresia, lo denuntiarò a questo S. Offizio» (*Opere*, XIX, 406-407).

La condanna, che fu firmata da sette giudici su dieci, non colpiva soltanto Galilei, non troncava solo le sue speranze e le sue illusioni. Dava un colpo mortale anche alle speranze di quanti, all'interno della Chiesa, avevano creduto non solo alle verità della nuova astronomia, ma anche alla possibilità, per la stessa Chiesa, di esercitare una funzione positiva nel mondo della cultura. Nella storia delle idee e in quella della scienza, il 1633 resta comunque un anno decisivo. Pochi mesi dopo la condanna (il 10 gennaio del 1634) Descartes scriveva a Mersenne di rinunciare a pubblicare il suo trattato sul mondo perché gli era giunta notizia della condanna di Galilei. Assumeva come sua divisa *bene vixit qui bene latuit* (bene visse chi bene si nascose) e confessava di avere la tentazione di «bruciare tutte le sue carte». Dieci anni dopo, nell'*Areopagitica*, John Milton rievocava la sua visita a Galilei (1639): i dotti italiani «lamentavano lo stato di servitù in cui la scienza era stata ridotta nella loro patria; era la ragione per cui lo spirito italiano, tanto vivo, si era spento e per cui da molti anni tutto ciò che si scriveva non era che adulazione e banalità».

La sentenza condannava Galilei al carcere formale. Il primo luglio del 1633 ottenne il trasferimento a Siena, dove l'arcivescovo Antonio Piccolomini lo accolse con amicizia sincera. Nel dicembre fu autorizzato a trasferirsi

nella sua villa di Arcetri, presso Firenze, a patto che vivesse ritirato, senza frequentare molte persone «né a discorrere né a mangiare». Il 2 aprile 1634 moriva la figlia prediletta Suor Maria Celeste e Galilei fu gettato «in una tristizia e melanconia immensa: inappetenza estrema, odioso a me stesso, et insomma mi sento continuamente chiamare dalla mia diletta figliola» (*Opere*, XVI, 85). Alla fine del 1637 sopravviene una progressiva cecità: «quel mondo e quello universo», scrive Galilei all'amico Diodati, «che io con le mie meravigliose osservazioni e chiare dimostrazioni aveva ampliato per cento e mille volte più del comunemente veduto da' sapienti di tutti i secoli passati, ora per me si è sì diminuito e ristretto ch'e' non è maggiore di quel che occupa la persona mia» (*Opere*, XVII, 247).

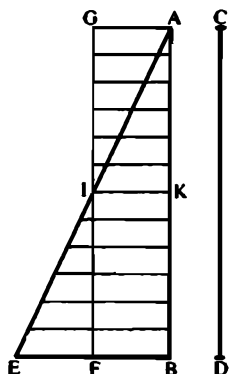
12. *La forza delle astrazioni: la nuova fisica.*

Gli studi compiuti su Galilei nel corso degli anni Settanta non solo hanno chiarito la grande importanza del giovanile *De motu* e de *Le mecaniche*, ma hanno anche mostrato, attraverso un accurato studio dei frammenti, che tutti i problemi di fondo della fisica galileiana fanno capo al decennio 1600-1610 (Wisan 1974). La maggiore opera scientifica di Galilei ha dunque una gestazione lunghissima. La stesura era già iniziata nei mesi trascorsi a Siena. Nel 1634, apprendiamo da una lettera a Fulgenzio Micanzio, il «trattato del moto» era già terminato. Ufficialmente all'insaputa di Galilei i *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno a due nuove scienze attinenti alla meccanica e ai movimenti locali* videro finalmente la luce a Leida, in Olanda, nel 1638. I tre interlocutori del *Dialogo* comparivano nuovamente. Nelle prime due giornate, dedicate al problema della resistenza dei materiali, si svolgeva un vero e proprio dialogo. Nella terza e nella quarta giornata, dedicate rispettivamente ai problemi del moto uniforme, naturalmente accelerato e uniformemente accelerato e a quello della traiettoria percorsa dai proiettili, Salviati legge un trattato in latino sul moto che si immagina composto dal suo amico Accademico. Solo qua e là la lettura è interrotta da domande di chiarimenti da parte dei due interlocutori. Una «quinta giornata» (sulla teoria euclidea delle proporzioni) e una «sesta giornata» (sul problema della percossa) verranno pubblicate rispettivamente nel 1774 e nel 1718.

Le teorie elaborate nei *Discorsi* relativamente alla resistenza dei materiali sono l'atto di nascita di un nuovo sapere: un *corpus* organico di teorie può essere per la prima volta applicato alla ingegneria civile e militare e alla scienza delle costruzioni. In questo contesto diventa rilevante la tesi, presente all'inizio dei *Discorsi*, che il «filosofare» debba prendere in attenta considerazione il lavoro dei tecnici e la pratica degli artigiani. La conversazione con i

meccanici «peritissimi e di finissimo discorso», dichiara Sagredo, mi ha aiutato più volte nella ricerca degli effetti «reconditi ancora e quasi inopinabili». Galilei sottolinea, in primo luogo, l'importanza della *scala* di una struttura come fattore determinante la sua resistenza e dimostra le ragioni della maggior resistenza del modello rispetto alla scala reale. Prismi e cilindri che differiscono in lunghezza e sottigliezza offrono una resistenza alle fratture (al supporto di pesi alle estremità) che è direttamente proporzionale ai cubi dei diametri delle loro basi e inversamente proporzionale alla loro lunghezza. Le ossa di un gigante dovrebbero essere sproporzionatamente spesse rispetto alla loro lunghezza: sia nell'arte sia nella natura non è concesso accrescere indefinitamente la dimensione delle strutture. La coesione dei solidi e la resistenza dei materiali viene spiegata facendo ricorso alla loro composizione atomica o corpuscolare, al fatto che esiste una resistenza alla formazione del vuoto fra le particelle (come è mostrato dalla resistenza alla separazione di due superfici liscie a contatto) o una sostanza vischiosa fra le stesse particelle. Nella sua analisi della frattura delle travi, Galilei ignora il cosiddetto effetto di compressione e considera inestensibili le fibre della trave.

La via percorsa da Galilei per giungere, nella terza giornata, alla rigorosa formulazione del moto uniformemente accelerato è stata ripercorsa più volte, talora con grande finezza di analisi, da filosofi e da storici della scienza. Quella formulazione si colloca al termine di un processo di sempre più rigorosa astrazione da ogni elemento sensibile e qualitativo. Nel giovanile *De motu* erano ancora presenti i concetti di pesantezza dei corpi, di moto naturale verso il basso dovuto alla pesantezza, di *vis impressa* intesa come una temporanea leggerezza che prevale sopra la naturale gravità. La velocità di caduta veniva posta in relazione alla densità e al peso specifico dei corpi. Alla ricerca delle cause si sostituisce ora una considerazione puramente cinematica: la velocità viene concepita come direttamente proporzionale allo spazio percorso. Questa ipotesi, accolta in una prima fase, viene in seguito abbandonata in favore di una diretta proporzionalità con il tempo, che ha una molto minore evidenza intuitiva: «Se un mobile discende, a partire dalla quiete, con moto uniformemente accelerato, gli spazi percorsi da esso in tempi qualsiasi... stanno fra loro come i quadrati dei tempi».

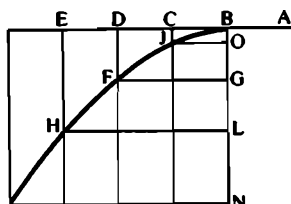
La relazione $D \div T^2$ (espressa nella proposizione 2 del Teorema II) deriva dal Teorema I per il quale il tempo durante il quale uno spazio qualunque è percorso da un mobile che parte dalla quiete e si muove con moto uniformemente accelerato è uguale al tempo durante il quale quel medesimo spazio sarebbe percorso dallo stesso mobile con un moto uniforme il cui grado di velocità sia la metà del più grande e ultimo grado di velocità raggiunto nel precedente moto uniformemente accelerato. Nella

figura, AB rappresenta il tempo durante il quale un mobile partendo dalla quiete in C percorre lo spazio CD con un moto uniformemente accelerato. EB rappresenta il più grande e ultimo dei gradi di velocità raggiunti durante l'intervallo di tempo AB. Si tracci AE. Le linee equidistanti e parallele a BE rappresentano i gradi crescenti di velocità dopo l'istante iniziale A. Dividiamo EB a metà con il punto F e tracciamo FG e AG rispettivamente parallele ad AB ed FB. Il parallelogramma AGFB sarà eguale al triangolo AEB perché GF taglia AE nel suo punto intermedio I. Se si prolungano le parallele contenute nel triangolo AEB fino a GIF «la somma di tutte le parallele contenute nel quadrilatero sarà eguale alla somma delle parallele contenute nel triangolo AEB». La somma di tutte le parallele contenute nel triangolo rappresenta i «gradi crescenti» di un moto uniformemente accelerato, mentre la somma di tutte le parallele contenute nel parallelogramma rappresenta i gradi di un moto uniforme. Le somme dei gradi di velocità nell'uno e nell'altro movimento saranno eguali: se la velocità aumenta uniformemente da O a EB, la distanza percorsa è eguale a quella percorsa in un tempo uguale con la velocità uniforme IK (che è la metà della velocità EB). In termini non galileiani: la somma delle velocità istantanee crescenti nel moto accelerato è eguale alla somma delle velocità istantanee costanti corrispondenti alla velocità media IK.

Non mancano in Galilei esitazioni ad un pieno riconoscimento della identificazione delle aree con le distanze ed egli non possiede una concezione del calcolo infinitesimale sufficientemente chiara per affermare «che la somma di un'infinità di piccole linee, ciascuna rappresentante una velocità, costituisce qualcosa di differente, cioè una distanza» (Shea 1974). Il metodo matematico atto a trattare grandezze variabili con continuità sarà costruito con il calcolo infinitesimale.

Il problema che si era posto Galilei nel trattatello in latino, inserito nei *Discorsi*, era quello di trovare una definizione del moto uniformemente accelerato che sia «esattamente congruente... a quella forma di accelerazione dei gravi discendenti di cui si serve la natura». Alla sua definizione Galilei afferma di essere stato quasi «condotto per mano» dalla constatazione che la natura fa uso, in tutte le sue opere, dei mezzi «più immediati, più semplici e più facili». Una pietra che discende dall'alto, a partire dalla quiete, acquista via via nuovi incrementi di velocità. Perché non credere che tali aumenti avvengano nel modo più semplice e più ovvio (*simplicissima et magis obvia ratione*)? All'esigenza di un aumento o incremento che «avvenga sempre nel medesimo modo» corrispondono egualmente due possibilità: la proporzionalità della velocità allo spazio; la proporzionalità della velocità al tempo. È stato più volte sottolineato che la scelta effettuata da Galilei fra queste due possibilità (che dal punto di vista della semplicità gli appaiono equivalenti) è collegata alla sua erronea dimostrazione del carattere logicamente contraddittorio della prima delle due ipotesi.

«Mediante una medesima suddivisione uniforme del tempo, possiamo concepire che gli incrementi di velocità avvengano con la stessa semplicità». Ciò è possibile perché stabiliamo in astratto (*mente concipientes*) «che risulti uniformemente e... continuamente accelerato quel moto che in tempi uguali, comunque presi, acquista uguali mutamenti di velocità». La definizione, osserva Sagredo, è arbitraria, «concepita e ammessa in astratto» e si può dubitare che essa si adatti alla realtà e si verifichi realmente in natura. Al termine della lunga dimostrazione, Simplicio avanza la stessa obiezione. Egli è persuaso della validità della dimostrazione, ma ha forti dubbi sul fatto che la natura, nel moto dei suoi gravi discendenti, si serva davvero di quel tipo di moto: «per intelligenza mia e di altri simili a me, parmi che sarebbe stato opportuno in questo luogo arrecar qualche esperienza». È a questo punto, per rispondere a questa richiesta, che Galilei inserisce nei *Discorsi* la celebre narrazione del canaletto inclinato dirittissimo ben pulito e liscio dentro il quale si fa scendere una palla di bronzo durissimo, ben rotonda e pulita. La formulazione della legge non è stata ricavata da quell'esperienza. E Galilei, in quella stessa pagina, lo afferma a tutte lettere: l'esperienza è stata compiuta «per assicurarsi che l'accelerazione de i gravi naturalmente discendenti segua nella proporzione sopradetta».

La quarta giornata dei *Discorsi*, che contiene l'analisi del moto dei proietti, è una delle dimostrazioni delle eccezionali qualità della scienza galileiana. In quelle pagine Galilei dimostra che la traiettoria di un proiettile è una parabola risultante dalla combinazione di due movimenti indipendenti e *che non interferiscono l'uno con l'altro*: un moto uniforme in avanti secondo l'orizzontale e un moto uniformemente accelerato verso il basso secondo la

verticale. Da questa legge, che risulta dalla combinazione del principio di inerzia con la legge della caduta libera, Galilei ricava la determinazione della velocità, altezza, gittata, quantità di moto. AB rappresenta un piano orizzontale che termina in B. Quando un corpo che si muove di moto uniforme raggiunge il punto B, viene introdotto un nuovo moto: la caduta verticale lungo BN. Ma il moto uniforme lungo l'orizzontale non viene eliminato. I due moti si combinano e il corpo si muove lungo la linea curva BJFH. In essa DF=4CJ perché BD=2BC e la distanza varia come il quadrato dei tempi. Allo stesso modo EH=9CJ. La curva è una semiparabola.

Non era solo la fine di un modo tradizionale di considerare il movimento. In queste pagine si poneva in modo radicalmente diverso che per il passato il problema dei rapporti fra il moto e la geometria.

Negli anni della vecchiaia, Galilei continua a scrivere lettere, ad appassionarsi ai problemi, a discutere e polemizzare. Accanto all'affettuoso Viviani e al più giovane dei suoi discepoli, Evangelista Torricelli, ritrova talvolta le antiche energie: polemizza con Fortunio Liceti, segue le discussioni fra il Viviani e il Torricelli, chiarisce la sua posizione nei confronti dell'aristotelismo. L'8 di gennaio del 1642, alle quattro del mattino, quegli occhi ormai ciechi che per primi nella storia del mondo avevano visto il paesaggio della Luna e le nuove stelle, si chiudevano per sempre. Per non «scandalizzare i buoni», non si volle che fosse costruito un «augusto e sontuoso deposito» per le spoglie mortali di Galilei. Non era bene, scrisse il nipote del Pontefice, «fabricar mausolei al cadavero di colui che è stato penitentiato nel Tribunale della Santa Inquisitione ed è morto mentre durava la penitenza».

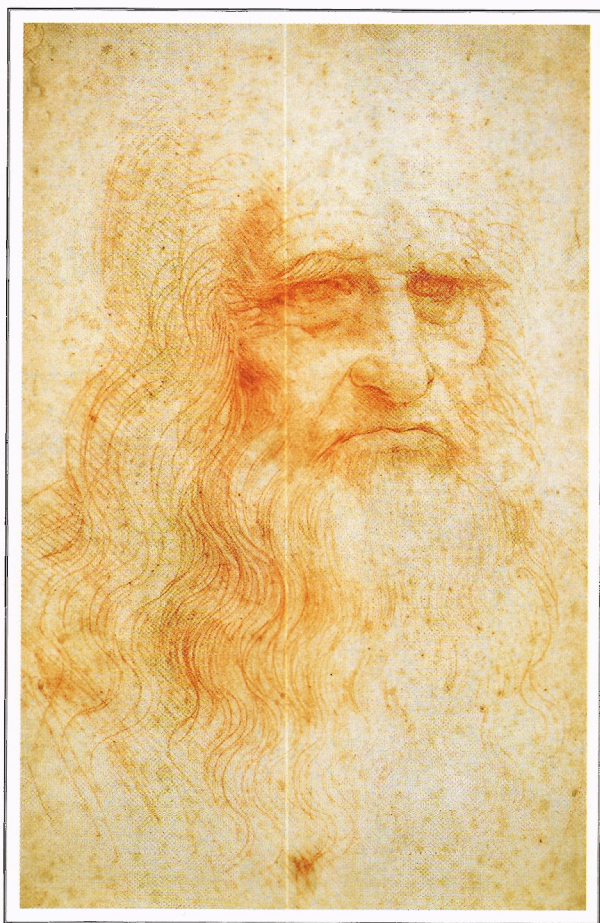
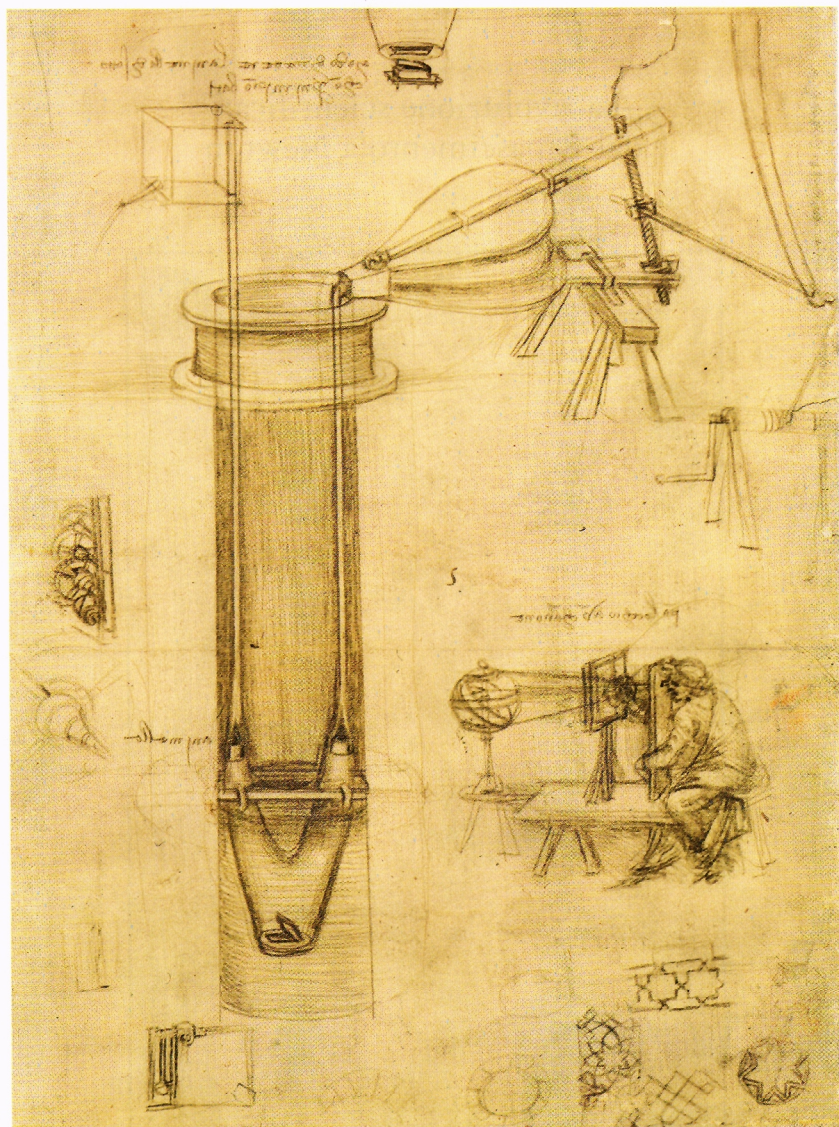
BIBLIOGRAFIA

Testi

G. Bruno, *Dialoghi italiani*, a cura di G. Aquilecchia, Firenze, Sansoni, 1958
G. Galilei, *Opere*, Firenze, Barbera, 1890-1909, 20 voll.
Id., *Dialogo sopra i due massimi sistemi*, a cura di L. Sosio, Torino, Einaudi, 1970

Studi

M.L. Altieri Biagi, *Galileo e la terminologia tecnico-scientifica*, Firenze, Olschki, 1965.
G. Arrighi, P. Galluzzi, M. Torrini, *La scuola galileiana: prospettive di ricerca*, Firenze, La Nuova Italia, 1979.
A. Banfi, *Galileo Galilei*, Milano, Feltrinelli, 1962.
Id., *Galileo Galilei*, Milano, Il Saggiatore, 1961.
M. Clavelin, *La philosophie naturelle de Galilée*, Paris, Colin, 1968.
G. De Santillana, *Processo a Galilei*, Milano, Mondadori, 1960.
S. Drake, *Galileo at work. his scientific autobiography*, Chicago, The University of Chicago Press, 1978.
M.A. Finocchiaro, *Galileo and the art of reasoning*, Dordrecht, Reidel, 1980.
P. Galluzzi (a cura di), *Novità celesti e crisi del sapere*, Supplemento agli «Annali dell'Istituto e Museo di storia della scienza», Firenze, 1983.
Id., *Momento: studi galileiani*, Roma, Edizioni dell'Ateneo, 1979.
L. Geymonat, *Galileo Galilei*, Torino, Einaudi, 1961.
A.R. Hall, *Da Galileo a Newton*, Milano, Feltrinelli, 1973.
G. Morpurgo Tagliabue, *I processi di Galileo e l'epistemologia*, Milano, Comunità, 1963.
P. Paschini, *Vita e opere di Galileo Galilei*, Città del Vaticano, 1964.
P. Redondi, *Galileo eretico*, Torino, Einaudi, 1983.
P. Rossi, *Profilo di Galileo Galilei*, in *Aspetti della rivoluzione scientifica*, Napoli, Morano, 1971.
Ch. Schmitt, *Experience and experiment: a comparison of Zabarella view with Galileo's in De Motu*, in «Studies in the Renaissance», XVI, 1969, pp. 80-138.
W.R. Shea, *La rivoluzione intellettuale di Galilei*, Firenze, Sansoni, 1974.
F. Soccorsi S.J., *Il processo di Galilei*, Roma, 1947.
W.A. Wallace, *Prelude to Galileo*, Dordrecht, Reidel, 1981.
W. Wisan, *The new science of motion A study of Galileo's De motu locali*, in «Archive for the History of Exact Sciences», a cura di C. Truesdell, XIII, 1974, nn. 2-3.

La rivoluzione scientifica: dal Rinascimento a Newton

Leonardo da Vinci

Leonardo da Vinci, disegno dal *Codice Atlantico* (tomo I, volume I, folio 5, recto) raffigurante una macchina a mantice per sollevare l'acqua.
Leonardo (1452-1519), attraverso gli studi di macchine, piante, animali, moti di aria e di acqua, affrontò la conoscenza scientifica in maniera empirica, inaugurando un nuovo modo di intendere il sapere scientifico.

Niccolò Copernico in un ritratto del sec. XVI. Personaggio fondamentale nella storia della scienza, Niccolò Copernico (1473-1543) è ricordato soprattutto per avere sostituito la concezione geocentrica con quella eliocentrica che segna l'avvento della concezione moderna dell'Universo: tutti i pianeti orbitano attorno al Sole; la Terra è un pianeta come tutti gli altri, animata da un movimento di rotazione.

Rappresentazione della concezione tolemaica dell'universo in una stampa tratta da *Harmonia macrocosmica* di Andreas Cellarius (1660). La dottrina di Tolomeo (sec. II d.C.) costituì l'ortodossia astronomica occidentale fino al Medioevo. Il suo compendio astronomico, *Almagesto*, descrive un universo geocentrico, ordinato e limitato, chiuso dalla sfera delle stelle fisse, collocate alla stessa distanza dalla Terra.

Il Sistema Solare e i pianeti in una stampa rinascimentale conservata all'Osservatorio astronomico di Brera, Milano. La teoria eliocentrica elaborata da Copernico (1473-1543) risaliva ad Aristarco di Samo, astronomo vissuto nel sec. III a.C. Gli studi di quest'ultimo furono però osteggiati consentendo l'affermazione della teoria geocentrica di Tolomeo. Copernico fu il primo a elaborare, agli inizi del sec. XVI, una concezione eliocentrica dell'Universo, con il Sole al centro delle orbite della Terra e degli altri pianeti. Questa visione diede inizio a una vera e propria rivoluzione scientifica.

La rivoluzione scientifica

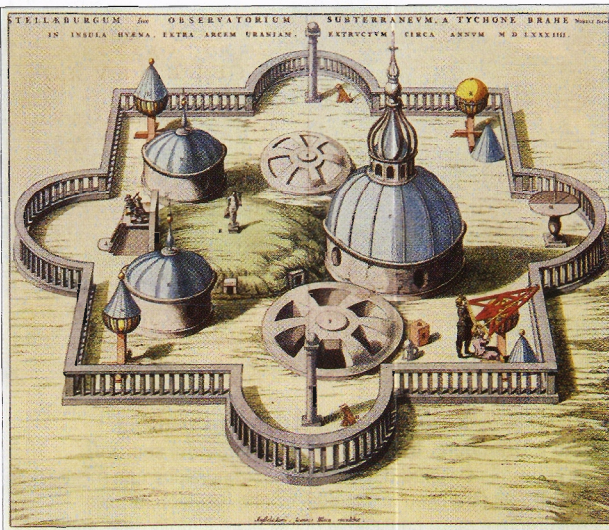
Il Sistema Solare e i pianeti in una stampa rinascimentale conservata all'Osservatorio astronomico di Brera, Milano. La teoria eliocentrica elaborata da Copernico (1473-1543) risaliva ad Aristarco di Samo, astronomo vissuto nel sec. III a.C. Gli studi di quest'ultimo furono però osteggiati consentendo l'affermazione della teoria geocentrica di Tolomeo. Copernico fu il primo a elaborare, agli inizi del sec. XVI, una concezione eliocentrica dell'Universo, con il Sole al centro delle orbite della Terra e degli altri pianeti. Questa visione diede inizio a una vera e propria rivoluzione scientifica.

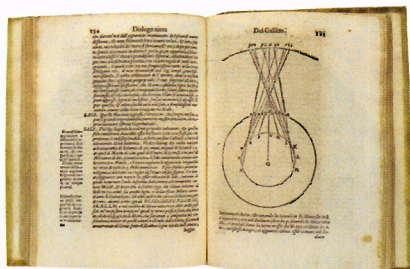
Girolamo Fracastoro in un ritratto del sec. XVI (National Gallery, Londra).
Il medico e umanista veronese (1483-1553), consapevole dell'inadeguatezza tra la realtà e ciò che l'occhio umano vede, con il suo trattato *De contagione et contagiosis morbis et curatione*, segnò una tappa fondamentale nella storia dell'epidemiologia. Fu il primo ad affermare chiaramente che le malattie infettive non erano provocate da corruzione degli umori, ma da contagio, ovvero da "seminaria" e "virus".

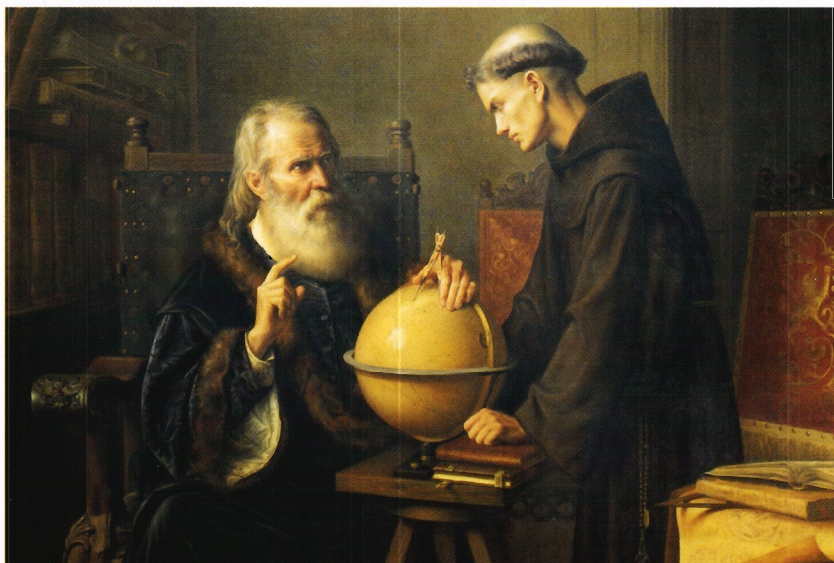
Prognostication auff xxiiii. jar zůkünfftig/durch den hochgelerten Doctorem Paracelsum/Geschriben zů dem Großmechtigsten/Durchleüchtigsten Fürsten vnd Herren/Herren Ferdinanden rc. Römischen Künig/Ertzhertzog zů Osterreych rc.

M. D. XXXVI.

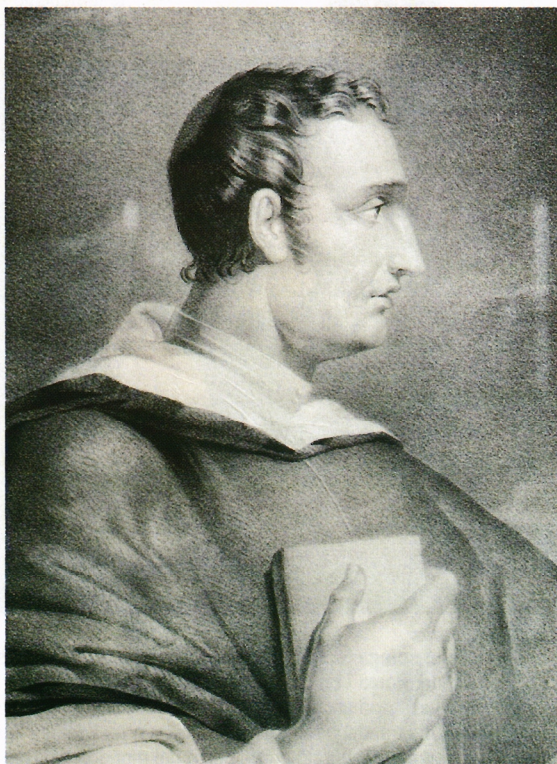
Frontespizio dell'opera paracelsiana *Prognostication*, data alle stampe nel 1536. La grande diffusione delle opere di Paracelso avvenne dopo la sua morte a opera dei primi paracelsiani come Gerard Dorn, Petrus Severinus e Oswald Croll.

Paracelso in un'incisione del sec. XVI. Medico e alchimista svizzero, Paracelso (1493-1541), il cui vero nome era Philipp Theophrast Von Holenheim, pubblicò opere che rappresentano la struttura teorica della filosofia chimica.

L'Osservatorio di Uraniborg (incisione del sec. XVI). Fatto costruire da Tycho Brahe nel 1576-96 sull'isola di Hven, in Danimarca, l'osservatorio divenne un importante centro di osservazione e ricerca astronomica.

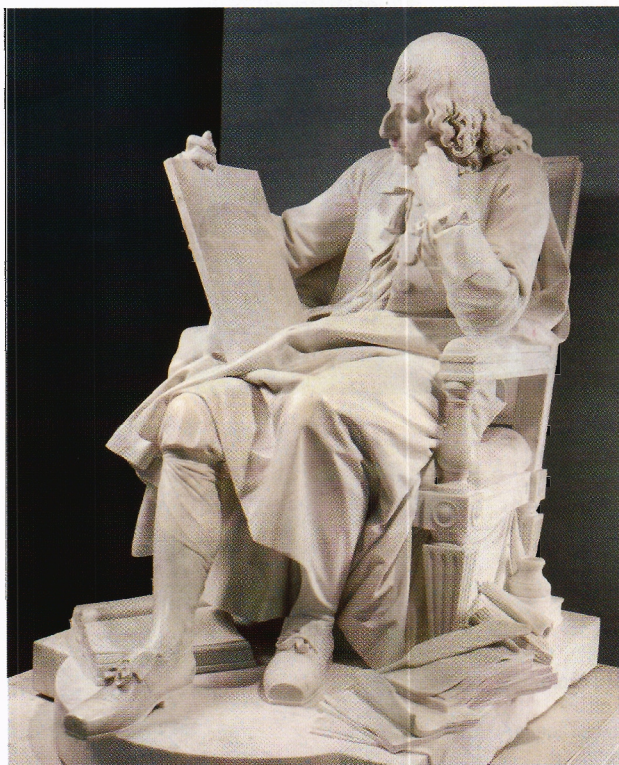
Tycho Brahe, illustrazione dal *Grande Atlante* di Bleau (1640) che raffigura il quadrante a muro costruito a Uraniborg, in Danimarca, alla fine del sec. XVI.
Tycho Brahe (1546-1601) contribuì allo sviluppo delle scienze astronomiche con misurazioni continue e sempre più precise. Tra gli strumenti di sua concezione (sestanti, armille equatoriali, orologi ecc.), il quadrante a muro consentiva di calcolare il moto delle stelle.

Un'edizione del *Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo* (1632). Galileo in quest'opera confrontava i sistemi tolemaico e copernicano.

I cannocchiali di Galileo Galilei. Anche se rudimentali, questi strumenti permisero al grande astronomo di osservare l'irregolarità della superficie lunare, come testimoniano i disegni pubblicati nel 1610 nella sua opera *Sidereus Nuncius*.

Galileo Galilei spiega le sue teorie a un religioso all'Università di Padova, dipinto di Felix Parra (1873). Galileo (1564-1642) sostenne che solo l'osservazione permette di porre domande appropriate e di accedere, tramite la matematica, alle leggi naturali. La condanna di Galilei e delle sue tesi deluse le speranze di chi credeva in un atteggiamento culturalmente aperto del mondo ecclesiastico dell'epoca.

William Harvey in un ritratto del sec. XVII. Al medico e fisiologo inglese (1578-1657) si deve la scoperta della circolazione del sangue, che venne resa pubblica per la prima volta nel 1616. Con le sue teorie, Harvey demolì definitivamente la concezione legata a Galeno (sec. II d.C.) aprendo la via al meccanicismo biologico. I suoi studi si concentrarono sul cuore, descritto come un muscolo «a pompa», e sul funzionamento delle valvole cardiache e di quelle venose.

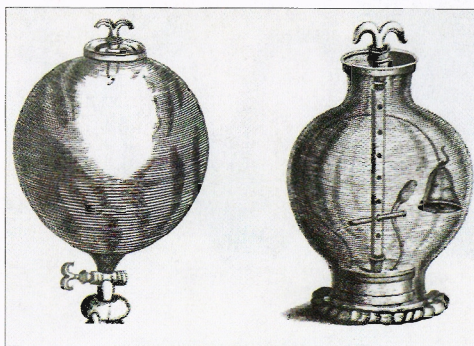
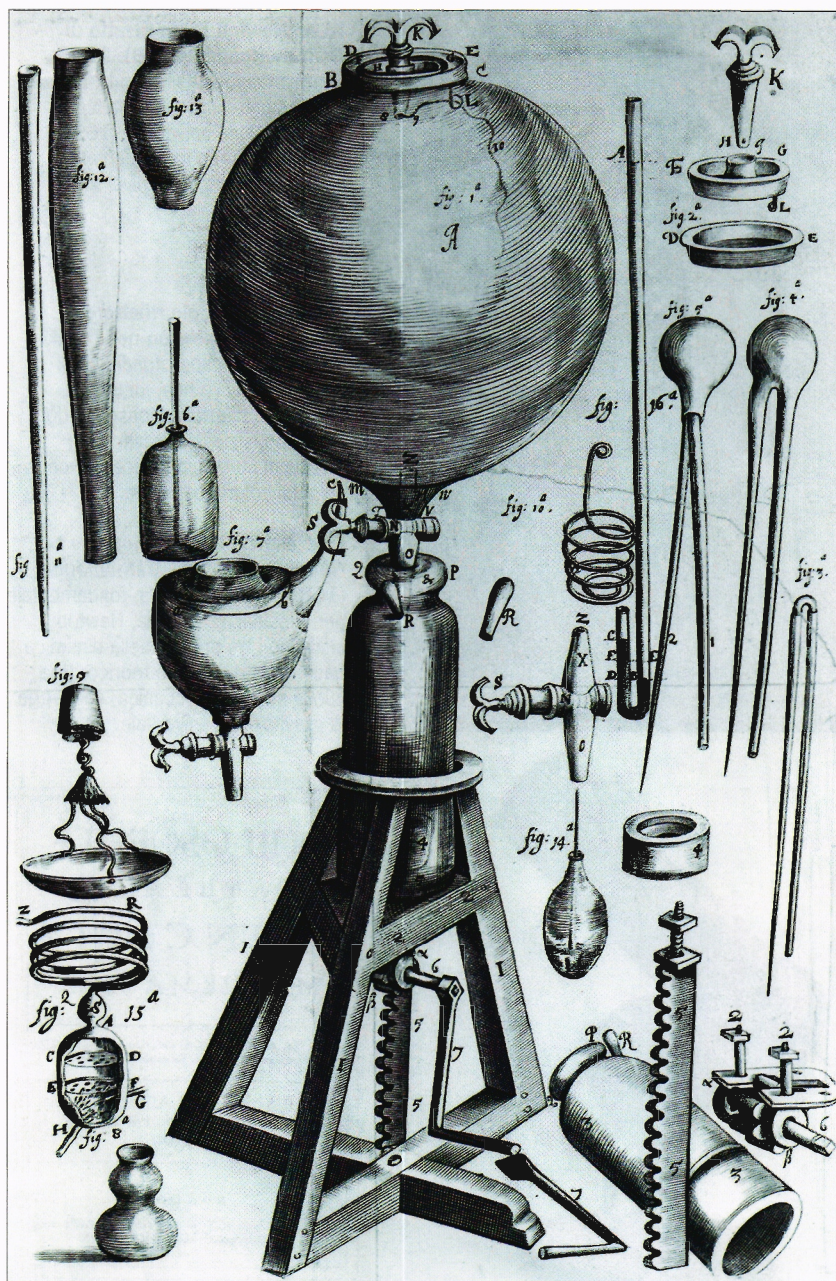
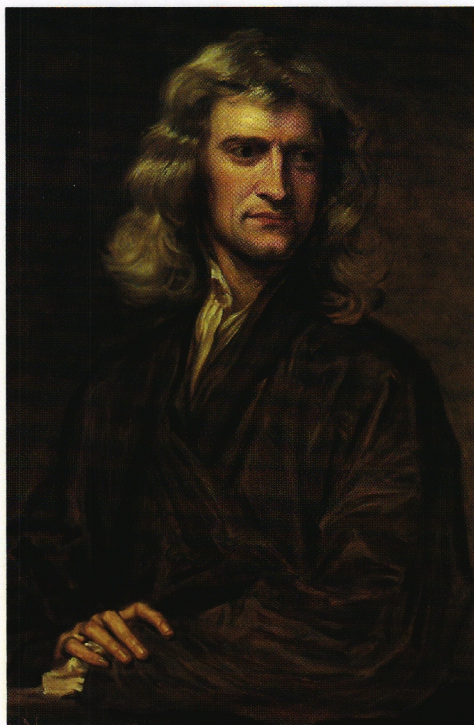
Tommaso Campanella in una litografia di Antonio Zezon (metà sec. XIX). Strenuo difensore delle tesi di Galileo Galilei, il grande filosofo (1568-1639) trascorse 27 anni in carcere, con l'accusa di avere congiurato contro la dominazione spagnola nel Sud Italia. A difesa delle proprie posizioni, scrisse in carcere l'opera *Apologia pro Galileo* (1616).

Cartesio in una stampa colorata del sec. XVII. Opponendosi alle teorie dominanti dell'epoca, che tendevano a risolvere ogni problema aritmetico o algebrico in termini geometrici, il filosofo e matematico francese Cartesio (René Descartes, 1596-1650) mostrò la possibilità di una trattazione algebrica dei problemi geometrici. Semplificò inoltre la scrittura matematica e fu il fondatore della geometria analitica.

Gian Domenico Cassini e il Re Sole in un'incisione del sec. XVIII.
L'astronomo (1625-1712) proseguì le ricerche di Galileo sulle macchie solari e grazie ai suoi studi divenne uno degli astronomi europei più noti, tanto da essere chiamato a Parigi dal Re Sole, Luigi XIV, presso l'Observatoire Royal.

Francesco Redi in un'incisione del sec. XIX. Medico e naturalista aretino, Redi (1626-1698) fu il fondatore della parassitologia. Nella sua opera *Osservazioni interne agli animali viventi che si trovano negli animali viventi* (1684), ricercò e descrisse ogni tipo di parassiti appartenenti all'uomo, ai rettili, agli uccelli, ai pesci e ai molluschi. Anche grazie al suo contributo, la parassitologia del Seicento riuscì a individuare, per esempio, la patogenesi della scabbia.

Blaise Pascal, statua in marmo di Alexandre Pajou (sec. XVIII). Pascal (1623-1662) frequentò l'Accademia di Montmor che dal 1654 riunì numerosi insigni studiosi francesi.

Robert Boyle in un ritratto su tela di F. Kerseboom (sec. XVII). Considerato un “filosofo naturale”, Boyle (1627-1691) vide nella chimica la scienza in grado di spiegare la visione meccanica della natura.

Tavole illustrate del XVII secolo in cui sono rappresentati alcuni strumenti per esperimenti sull'acqua, realizzati da Robert Boyle.

fig: 13ª
fig: 12ª
fig: 1ª
A
fig: 2ª
fig: 5ª
fig: 4ª
fig: 6ª
fig: 16ª
fig: 10ª
fig: 7ª
fig: 3ª
fig: 9
fig: 14ª
fig: 15ª
fig: 8ª

Isaac Newton in un ritratto di Godfrey Kneller (1689). Il fisico e matematico inglese (1642-1727) con la sua definizione della legge di gravitazione universale (1666) segnò una tappa fondamentale nella concezione dell'universo e per l'astronomia.

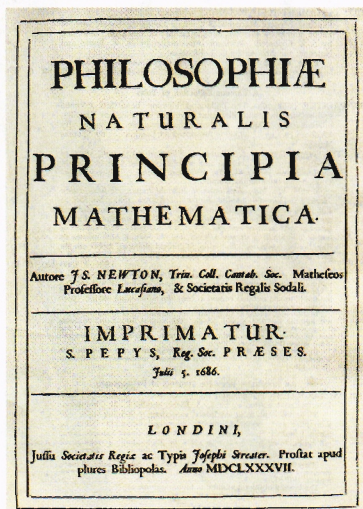
Il primo telescopio riflettore realizzato da Newton nel 1668. Newton compì approfonditi studi nel campo dell'ottica, ideando il telescopio riflettore e osservando la scomposizione attraverso un prisma di un fascio di luce bianca nei suoi colori costituenti.

PHILOSOPHIÆ
NATURALIS
PRINCIPIA
MATHEMATICA.

Autore JS. NEWTON, Trin. Coll. Cantab. Soc. Matheseos Professore Lucasiano, & Societatis Regalis Sodali.

IMPRIMATUR.
S. PEPYS, Reg. Soc. PRÆSES.
Julii 5. 1686.

LONDINI,
Jussu Societatis Regiæ ac Typis Josephi Streater. Prostat apud plures Bibliopolas. Anno MDCLXXXVII.

Frontespizio dei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1686). In quest'opera, fondamentale per la scienza moderna, Newton individuò i tre principi della dinamica, base di tutto l'edificio teorico della nuova scienza meccanica, e la legge di gravitazione universale.

VIII. *La filosofia meccanica* (di Paolo Rossi)

1. *Ostacoli epistemologici alla nuova fisica.*

La storia della scienza serve anche a mostrare che ciò che i manuali contemporanei presentano come una serie di *dati* è in realtà il risultato, *uno* fra i risultati possibili, di un processo storico che non è né lineare né continuo e nel corso del quale le domande sui fatti e sulla verità si sono continuamente intrecciate con altre domande. Da questo punto di vista la storia della scienza tende a far apparire come non ovvi e non naturali quei concetti che sono consegnati ai manuali di fisica o di biologia, che vengono trasmessi come verità atemporali e che sono invece il risultato del lavoro intellettuale di due millenni, nel corso dei quali non si sono soltanto modificati i linguaggi e le teorie, ma dati neutri della percezione si sono di volta in volta trasformati in fatti per la conoscenza scientifica. Ciò che appare oggi saldamente codificato e viene trasmesso come tale è invece il risultato di scelte, opzioni, contrasti, alternative. Quelle alternative e quelle scelte, *prima* della poi avvenuta codificazione, erano reali e non immaginarie.

Uno studente delle scuole medie dei nostri giorni sa distinguere fra il *peso* di un corpo (che varia con la sua distanza dalla Terra) e la *massa* di un corpo (che, per la fisica classica o precedente ad Einstein, è la stessa in tutti i punti dell'universo); conosce la prima legge di Newton o il *principio di inerzia* e sa quindi che, in assenza di resistenze esterne, per arrestare un corpo in moto rettilineo uniforme è necessaria l'applicazione di una forza e che il moto rettilineo uniforme è pertanto, come la quiete, uno stato «naturale» dei

corpi. Quello studente conosce anche la seconda legge di Newton secondo la quale è la *accelerazione* e non la velocità a risultare proporzionale alla forza applicata (a differenza di quanto riteneva Aristotele che affermava che l'applicazione di una certa forza dà al corpo una velocità determinata); sa infine qualcosa che risultava del tutto inconcepibile nella fisica antica: che cioè una forza *costante* imprime a un corpo un moto *variabile* (uniformemente accelerato) e che una qualsiasi forza, per quanto piccola, è in grado di fare ciò su una qualsiasi massa, per quanto grande. Sa anche che ogni moto circolare è un moto accelerato e che il moto circolare (a differenza di quanto riteneva la fisica prenewtoniana e di quanto pensava lo stesso Galilei) non è affatto «naturale», ma deve essere spiegato facendo ricorso ad una forza.

La storia della fisica, dalle elaborazioni tardoscolastiche della teoria dell'*impetus* fino alle limpide pagine dei *Principia* di Newton, è la storia di una profonda rivoluzione concettuale che porta a modificare in profondità le nozioni di moto, massa, peso, inerzia, gravità, forza, accelerazione. Si tratta, insieme, di un nuovo metodo e di una nuova concezione generale dell'universo fisico. Si tratta, anche, di modi nuovi di determinare i fini, i compiti, gli scopi della conoscenza della natura.

All'inizio del capitolo su *La rivoluzione astronomica* si sono elencati i «presupposti» che fu necessario abbandonare per la costruzione della nuova astronomia (e della nuova fisica). Rinviando a quelle pagine per la fondamentale distinzione aristotelica fra i *moti naturali* e i *moti violenti* e per l'idea della «perfezione» connessa ai moti circolari, si può tentare di elencare una serie di convinzioni dalle quali fu necessario faticosamente distaccarsi perché giungesse a costituirsi la cosiddetta «fisica classica» di Galilei e di Newton. La apparente ovvietà di tali convinzioni fu di grandissimo ostacolo alla fondazione della scienza moderna. Quella ovvietà non era legata solo (come nel caso dei manuali di cui si parlava all'inizio) all'esistenza di tradizioni di pensiero che avevano antiche e ben solide radici, ma anche alla loro maggiore vicinanza al cosiddetto senso comune. Le tre convinzioni che seguono si presentano infatti come «generalizzazioni» di osservazioni empiriche occasionali:

1) I corpi cadono perché sono pesanti, perché tendono cioè al loro *luogo naturale*, che è posto al centro dell'universo. Hanno quindi in sé un principio intrinseco di moto e cadranno tanto più velocemente quanto più sono pesanti. La velocità di caduta è direttamente proporzionale al peso: lasciando cadere simultaneamente due sfere pesanti rispettivamente 1 kg e 2 kg, quella di due chili toccherà terra per prima e quella da un chilo impiegherà il doppio di tempo.

2) Il mezzo attraverso il quale si muove un corpo è un elemento essenziale

del fenomeno movimento, del quale è necessario tener conto nel determinare la velocità della caduta dei gravi. La velocità di un corpo in caduta libera (direttamente proporzionale al peso) era in genere considerata inversamente proporzionale alla densità del mezzo. Nel vuoto la velocità sarebbe infinita e questo era un argomento contro l'esistenza del vuoto.
3) Poiché tutto ciò che si muove è mosso da qualcosa d'altro (*omne quod movetur ab alio movetur*), il moto violento di un corpo è prodotto da una forza che agisce su di esso. Il moto ha bisogno di un *motore* che lo produca e lo conservi in moto durante il movimento. Non è necessario addurre una qualche causa per spiegare il perdurare dello stato di quiete di un corpo, perché la quiete è lo stato naturale dei corpi. Il moto (ogni tipo di moto: sia naturale, sia violento) è qualcosa di innaturale e di provvisorio (fanno eccezione i «perfetti» moti circolari celesti) che cessa non appena cessa l'applicazione di una forza (il cavallo) e si muove tanto più rapidamente quanto maggiore è la forza applicata. Se la forza applicata è la medesima, si muove tanto più lentamente quanto maggiore è il suo peso. Cessando la applicazione della forza cessa anche il movimento: *cessante causa, cessat effectus*, quando si ferma il cavallo si ferma anche il carretto.

Tutte e tre queste generalizzazioni, come si è detto, nascono dal riferimento a situazioni legate all'esperienza quotidiana: la caduta di una piuma e quella di una pietra, il moto di un carretto tirato da un cavallo. Esse appaiono inoltre legate ad una concezione antropomorfica del mondo, che assume le sensazioni e i comportamenti e le percezioni dell'uomo, nella loro immediatezza, come criteri per la realtà. Alle radici degli «errori» della fisica degli antichi stanno motivazioni profonde, radicate nella nostra fisiologia e nella nostra psicologia. Perché, si domanda René Descartes nei *Principia* (1644), ordinariamente ci inganniamo pensando che sia necessaria una maggiore azione per il movimento che per il riposo? Siamo caduti in questo errore, scrive, «fin dall'inizio della nostra vita», perché siamo abituati a muovere il nostro corpo secondo la nostra volontà e il corpo viene avvertito in riposo solo per il fatto che «è attaccato alla Terra con la pesantezza, di cui non sentiamo la forza». Dato che questa pesantezza resiste al movimento delle membra e fa sì che ci stanchiamo nel corso dei nostri movimenti «ci è sembrato che ci volesse una forza più grande e più azione per produrre un movimento che per fermarlo» (*Opere*, II, 88).

La scienza moderna non è nata sul terreno della generalizzazione di osservazioni empiriche, ma (come si è visto nel caso di Galilei) su quello di un'analisi capace di *astrazioni*, capace cioè di abbandonare il piano del senso comune, delle qualità sensibili, dell'esperienza immediata. Il principale strumento che rese possibile la rivoluzione concettuale della fisica fu, come è noto, la *matematizzazione* della fisica. Ai suoi sviluppi dettero contributi

decisivi Galilei, Pascal, Huygens, Newton, Leibniz. Ma al centro di questo grande e complicato processo è da collocare la figura di Descartes.

2. *La fisica cartesiana.*

Sulla base dei risultati raggiunti da François Viète (1540-1603) la geometria analitica di Descartes realizza una svolta decisiva nei confronti della tradizione antica. Quest'ultima tendeva a risolvere ogni problema aritmetico o algebrico in termini geometrici. Descartes mostra la possibilità di una trattazione algebrica di problemi geometrici. Fin dall'inizio del suo trattato *La Géométrie* (1637) egli parla di «introdurre termini matematici nella geometria» e rompe decisamente con la tradizione che associava a grandezze algebriche elevate al quadrato o al cubo grandezze geometriche «analoghe» facendo corrispondere al «grado della potenza» il «numero delle dimensioni». Per Descartes, in altri termini, $(a+b)^2$, il quadrato della somma di due linee, è esso stesso una linea e non un'area. A espressioni quadratiche o cubiche corrispondono enti geometrici lineari. Le linee di una figura geometrica vengono designate mediante lettere. Formando equazioni fra quelle lettere, la soluzione delle equazioni dà la lunghezza di una linea sconosciuta. L'introduzione di quelle *coordinate* che portano ancor oggi il nome di *cartesiane* consente inoltre di definire la posizione di un punto e di far corrispondere (cinematicamente) un'equazione alla linea retta o curva tracciata da quel punto. Le equazioni possono essere rappresentate geometricamente, e le curve sono rappresentabili mediante equazioni. Mediante operazioni algebriche sulle equazioni che rappresentano determinate curve si possono studiare le proprietà di quelle curve.

Attraverso quella «scoperta» cartesiana i problemi della fisica, e in particolare quelli della meccanica, possono venire sottoposti all'attacco risolutivo dell'algebra. Si pensi, per fare un esempio, alla determinazione, mediante equazioni, della parabola di un proiettore. Appaiono ancora di insuperata chiarezza, a questo proposito, le frasi scritte da Ernst Cassirer: «spazio, tempo, velocità, che considerati in se stessi non sembrano poter esser messi in rapporto l'uno con l'altro, diventano *omogenei*: la matematica ha scoperto un procedimento per mezzo del quale l'unità di misura di una grandezza può esser riferita a quella dell'altra».

René Descartes (latinizzato in Cartesius e italianizzato in Cartesio) nacque a La Haye (Touraine) il 31 marzo 1596 da un famiglia di piccola e recente nobiltà. A nove o dieci anni fu inviato al celebre collegio dei Gesuiti a La Flèche dove rimase per otto anni. Pur avendo appreso molto ed anche scorso tutti i libri che gli capitavano fra le mani, al termine del suo corso di studi si trovò «imbarazzato da tanti dubbi ed errori» da poter concludere

che quegli anni gli erano serviti a «scoprire sempre più la sua ignoranza». Uno dei maestri, Marin Mersenne, restò tuttavia, per tutta la sua vita il suo principale corrispondente. Appena uscito dalla tutela dei precettori, nel 1618, «deciso a ricercare solo quel sapere che poteva trovarsi in me stesso o nel gran libro del mondo», impiegò il resto della sua giovinezza «a viaggiare, a visitare corti ed eserciti, a frequentare gente di varia indole e condizione, a raccogliere esperienze diverse». Si arruolò nell'esercito di Maurizio di Nasssau, a Breda, in Olanda. Qui, nel 1619, conobbe Isaac Beeckman (1588-1637) maestro della scuola di latino di Dordrecht, un uomo di interessi enciclopedici e di sterminate letture che appuntava nel suo celebre *Journael* le riflessioni e le idee (non poche delle quali importanti e originali) che gli derivavano da tali letture o dalle sue proprie ricerche. Lo scritto *Compendium musicae*, nel quale è già presente la tipica tesi cartesiana dell'analisi matematica dei dati sensibili, fu offerto in dono da Cartesio all'amico. Nel 1619 Descartes si arruolò nelle truppe dell'Elettore di Baviera. La notte del 10 novembre, presso Ulm, in una sorta di crisi di esaltazione mistico-scientifica intuì, come per una rivelazione «il fondamento di una scienza meravigliosa». Il giorno successivo fece il voto di un viaggio alla Madonna di Loreto da compiere quando quel progetto si fosse realizzato. Nel 1622, dopo essere stato in Boemia e in Ungheria, tornò in Francia e l'anno seguente viaggiò in Italia. Agli anni 1627-28 risale probabilmente la stesura delle *Regulae ad directionem ingenii*, un testo fondamentale per il metodo. Nel 1629 Descartes si stabilì in Olanda ove rimarrà fino al 1649. Nel 1630 iniziò la stesura di *Le Monde ou Traité de la lumière et L'Homme*, un testo che Cartesio decise di non pubblicare dopo che gli giunse, nel 1633, notizia della condanna di Galilei. La prima edizione uscirà nel 1664, più di quattordici anni dopo la morte del suo autore. Il *Discours de la méthode*, uno dei testi fondamentali della filosofia moderna, fu pubblicato a Leyda (8 giugno 1637) come introduzione a tre saggi scientifici: la *Dioptrique*, le *Météores* e la *Géométrie*. Quest'opera, alla quale Descartes affidava l'immagine di sé che intendeva presentare ai dotti del suo tempo e che raccoglie i risultati di due decenni di lavoro, ebbe un curioso destino. Fino dal 1644 fu sottoposta ad una operazione di smembramento che condusse ad isolare la *Géométrie* (che fu nel Seicento e Settecento l'opera più discussa e commentata) e, più tardi, il *Discorso sul metodo* letto come opera esclusivamente «filosofica». Nel 1641 è terminata, a Parigi, la stampa delle *Meditationes de prima philosophia* e delle obiezioni e risposte, un trattato di metafisica iniziato intorno al 1629. Nel 1647 ne uscirà una traduzione francese. Le dottrine cartesiane vengono condannate, nel 1642, dall'Università di Utrecht. L'anno successivo esce l'*Epistola ad Gilbertum Voetium* (Gijsbert Voët era stato uno dei principali accusatori e critici). Nel 1644 vengono pubblicati i *Principia philosophiae* che

contengono, negli ultimi tre libri, una esposizione della fisica. Nel 1647 l'Università di Leyda accusa Descartes di pelagianesimo. Dopo due periodi trascorsi in Francia, Descartes accetta l'invito rivoltogli da Elisabetta, regina di Svezia e nel 1649 parte per Stoccolma. In quell'anno esce il *Traité des passions de l'âme*. Nel 1650, a Stoccolma, Cartesio muore stroncato da una polmonite.

Descartes contribuì notevolmente alla costruzione del mito di sé medesimo: un filosofo solitario, di poche letture, attento solo alle voci che giungono dall'interno della coscienza. Ma il numero grandissimo delle sue lettere (molte delle quali riguardano temi fondamentali della scienza) basterebbe da solo a incrinare questo mito. Descartes ha familiarità con i testi dei maggiori autori del suo tempo: Simon Stevin e François Viète fra gli studiosi di algebra e matematica; Keplero e Christoph Scheiner (1575-1650) fra i cultori di ottica; Gabriel Harvey fra i medici; Francis Bacon tra i filosofi naturali e i teorici di un nuovo metodo. Egli conosce la matematica dei greci e le versioni di alto livello che ne avevano dato i manuali di Christoph Clavius (1537-1612), l'ottica arabo-latina, la fisica dei moderni seguaci dell'atomismo.

La legge della caduta dei gravi venne formulata da Cartesio nel 1629 (*Oeuvres*, I, 71) secondo la falsa formula che vede nella velocità del mobile non una funzione del tempo trascorso, ma dello spazio percorso. Nel suo grandioso tentativo di una completa e razionale *ricostruzione* del mondo fisico, Descartes giungeva ad una importante definizione del concetto di movimento e ad una chiara formulazione del principio di inerzia. La sua seconda «legge della natura» afferma chè «ogni corpo che si muove tende a continuare il suo movimento in linea retta» (*Opere*, II, 94-98). Rovesciando le impostazioni di Copernico (e di Galilei), Descartes afferma che «ogni parte della materia, nel suo particolare, non tende mai a muoversi secondo linee curve, ma secondo linee rette» e che «ogni corpo che si muove è determinato a muoversi secondo una linea retta e non già secondo una circolare». Nel moto circolare è presente una tendenza «ad allontanarsi senza posa» dal circolo che viene descritto: «e lo possiamo anche sentire con la mano, nel mentre che facciamo girare questa pietra in questa fionda». Questa «considerazione» appare a Cartesio di grande importanza. Con essa veniva finalmente distrutto il mito della perfezione della circolarità.

Il moto di cui hanno finora «parlato i filosofi» è ben diverso da quello concepito da Cartesio, che non è un *processo*, ma uno *stato* dei corpi ed è sullo stesso piano ontologico della quiete: il fatto di essere in quiete o in moto non provoca nei corpi alcun mutamento. *Movimento* e *materia* sono i due soli ingredienti che costituiscono il mondo e la fisica cartesiana è rigidamente meccanicistica: tutte le forme dei corpi inanimati possono essere spiegate

senza che a tal fine sia necessario attribuire alla loro materia altro che il movimento, la grandezza, la forma e l'organizzazione delle sue parti. *Res cogitans* e *res extensa* appaiono realtà rigidamente separate. La natura non ha nulla di psichico e non può essere interpretata con le categorie dell'animismo: «Col termine natura non intendo affatto qualche divinità o qualche tipo di potenza immaginaria, ma mi servo di questa parola per indicare la materia stessa, in quanto dotata di tutte le qualità che le ho attribuito, intese tutte insieme, e sotto la condizione che Dio continui a conservarla nello stesso modo in cui l'ha creata». Per il fatto che Dio continui a conservarla, i diversi mutamenti che in essa avvengono non potranno essere attribuiti all'azione di Dio, ma alla stessa natura: «le regole secondo le quali tali mutamenti avvengono le chiamerò leggi della natura».

Come in ogni prospettiva meccanicistica, Cartesio fa uso di modelli per l'interpretazione della natura: il mondo delle idee non è affatto lo specchio del mondo reale e non c'è alcuna ragione di credere (anche se normalmente tutti ne siamo convinti) «che le idee contenute nel nostro pensiero siano del tutto simili agli oggetti dai quali derivano». Come le parole, nate da convenzione umana, «bastano a farci pensare cose alle quali non somigliano affatto», così la natura ha stabilito «segni» che ci danno sensazioni pur non avendo in sé nulla di somigliante a quelle sensazioni.

La *materia*, com'è noto, si riduce per Cartesio ad *estensione* e si identifica con essa. Fra la materia e lo spazio occupato dalla materia si dà come unica differenza la mobilità: nel senso che un corpo materiale è una forma dello spazio che può essere trasportata da un luogo ad un altro senza perdere la propria identità: «la stessa estensione in lunghezza, larghezza e profondità, che costituisce lo spazio, costituisce il corpo; e la differenza che c'è fra essi non consiste se non in questo, che noi attribuiamo al corpo un'estensione particolare, che concepiamo cambiare di luogo con lui tutte le volte che esso è trasportato» (*Opere*, II, 77). Se *spazio* e *moto* costituiscono il mondo, l'universo di Cartesio è la *geometria realizzata*.

L'identificazione cartesiana di spazio e materia comportava una serie di conseguenze: 1) la identità della materia che costituisce il mondo; 2) l'estensione indefinita del mondo; 3) la divisibilità all'infinito della materia; 4) la impossibilità del vuoto. Come lo spazio euclideo, il mondo o «la materia estesa che compone l'universo non ha limiti» (*Opere*, II, 81). Dato che l'attributo della *infinità* compete solo a Dio e l'infinità non può essere compresa e analizzata dall'intelletto finito dell'uomo «chiameremo *indefinite* queste cose piuttosto che *infinite* al fine di riservare solo a Dio il nome di infinito» (*Ibid.*, 39-40). La negazione cartesiana del vuoto è più radicale di quella dello stesso Aristotele: per Descartes lo spazio vuoto è impossibile, se ci fosse sarebbe un nulla esistente, una realtà contraddittoria. Il nulla non ha

proprietà né dimensioni. La distanza fra due corpi è una dimensione e la dimensione coincide con una materia che è troppo «sottile» per essere percepita e che immaginiamo come «il vuoto». La realtà è costituita, per Cartesio, di corpuscoli, ma Cartesio si distanzia fortemente dalla tradizione dell'atomismo per due ragioni: perché concepisce le particelle che costituiscono il mondo come divisibili all'infinito e perché non ammette l'esistenza del vuoto.

L'acqua, la terra, l'aria e tutti gli altri corpi simili che ci stanno intorno, scrive nelle *Meteore*, suppongo siano composti «di parecchie particelle diverse per forma e grandezza, particelle che non sono mai così ben disposte e congiunte insieme così perfettamente, che non restino intorno ad esse numerosi intervalli; questi non sono vuoti, ma pieni di una materia sottilissima per la cui interposizione si comunica l'azione della luce» (*Opere scientifiche*, II, 361-362). Cartesio non si pone solo il problema dell'attuale costituzione dell'universo, ma anche quello della sua formazione. L'universo deriva dalla materia-estensione suddivisa da Dio in cubi, nelle forme più semplici della geometria. Dio ha messo in moto, relativamente le une alle altre, le parti dell'universo e i cubi sono stati messi «in agitazione». Si sono in tal modo formati i *tre elementi* costitutivi del mondo. In conseguenza dello sfregamento si produce nei cubi uno smussamento degli angoli e degli spigoli. I cubi assumono forma diversa e diventano delle piccole sfere. Le infinitesimali particelle prodotte dalla «raschiatura» costituiscono il *primo elemento* «luminoso la cui agitazione è la luce. Questo primo elemento «è come un liquido, il più sottile e penetrante che ci sia al mondo»; le sue parti non hanno forma e grandezza determinata ma «cambiano forma ad ogni istante per adattarsi a quella dei luoghi in cui entrano». Non ci sarà di conseguenza un passaggio così stretto, né un angolo così piccolo che queste particelle non possano esattamente riempire. Il moto di questa materia è paragonato al corso di un fiume che si diffonde direttamente dal Sole causando la sensazione della luce (*Oeuvres*, II, 364-365). Se il primo elemento (paragonabile al Fuoco) *è* la luce, il *secondo elemento trasmette* la luce: è «luminifero» ed è l'*etere* che forma i cieli. Le sue particelle sono tutte «press'a poco sferiche e unite insieme, come granelli di sabbia o di polvere». Esse non si possono stipare né comprimere fino a far scomparire quei piccoli intervalli nei quali «il primo elemento riesce a scivolare facilmente». Il *terzo elemento* deriva anch'esso dalle «raschiature» che si riuniscono in particelle a forma di vite e provviste di scanalature. Tali particelle si saldano assieme dando origine a tutti i corpi terrestri ed opachi. Le parti del terzo elemento sono «così grosse e talmente unite insieme che hanno la forza di resistere sempre al movimento degli altri corpi». Le particelle dell'acqua sono invece «lunghe, levigate e liscie come piccole anguille, che, per quanto si congiunga-

no e intreccino insieme, non s'annodano né si attaccano mai in modo tale che non sia poi possibile staccarle facilmente l'una dall'altra» (*Opere scientifiche*, II, 362-363).

La *materia sottile* che compone i cieli esercita nella fisica cartesiana funzioni decisive: è a fondamento della rarefazione e condensazione, della trasparenza e opacità, della elasticità, della stessa gravità. In un universo pieno il moto si configura necessariamente come spostamento o risistemazione e, in queste condizioni, ogni movimento tende a creare un turbine o vortice. Tutti i movimenti che avvengono al mondo sono in qualche modo circolari: «vale a dire che quando un corpo lascia il suo posto, va sempre in quello di un altro, che va nel luogo di un terzo, e così di seguito fino all'ultimo, che occupa allo stesso istante il posto lasciato dal primo, di modo che non si ha più vuoto fra loro, mentre si muovono, di quanto non se ne abbia quando sono fermi». Poiché nel mondo non esiste il vuoto «non è stato possibile che tutte le parti della materia si siano mosse in linea retta, ma, essendo all'incirca eguali e potendo venir tutte deviate quasi con la stessa facilità, esse hanno dovuto assumere tutte insieme un certo movimento circolare». Poiché fin dall'inizio Dio le ha mosse in modi diversi, esse si sono messe a girare «non attorno a un unico centro, bensì intorno a molti centri diversi». Le particelle globulari del secondo elemento hanno formato larghi vortici ruotanti. A causa della forza centrifuga le particelle del primo elemento sono state spinte verso il centro. Il Sole e le stelle fisse sono ammassi (a forma di globo) di particelle del primo elemento. Sia il primo sia il secondo elemento circondano, a guisa di vortici liquidi, il Sole e le stelle. In questi vortici «galleggiano» i pianeti che vengono trascinati attorno al Sole dal moto del vortice minore: allo stesso modo in cui pezzetti di legno girano in piccoli gorghi che sono a loro volta trascinati dalla corrente maggiore del fiume. Le comete non sono fenomeni ottici, ma corpi celesti reali che viaggiano senza fine alla periferia dei vortici passando da un vortice all'altro. Nell'universo indefinitamente grande l'espansione dei vortici è impedita dai vortici confinanti. I vortici, finalmente, generano le forze che trattengono i pianeti nelle loro orbite. Questa dottrina non dava conto dei dettagli tecnici dell'astronomia planetaria (Descartes non menziona le leggi di Keplero) ma rispettava i canoni fondamentali del meccanicismo: senza il ricorso a «forze occulte» di nessun tipo essa appariva in grado di spiegare la rotazione dei pianeti attorno al Sole.

In un mondo che è tutto pieno di materia e nel quale non esiste il vuoto, ogni movimento si configura necessariamente come un urto. Il tema dell'*urto* o della *percossa* è per questo al centro della fisica di Cartesio. Data la immutabilità di Dio, la quantità di moto dell'universo rimane costante. Con questo termine Cartesio indica il prodotto della «misura» di un corpo per la

sua velocità. Ma la sua «misura» non coincide con la nostra «massa» e la velocità non viene da lui trattata come una quantità vettoriale (Westfall 1984, 150). Non vi è tuttavia necessità che rimanga costante la quantità di moto di ogni corpo. Nell'urto il moto può essere trasferito da un corpo ad un altro. La terza legge della natura è così formulata: «Se un corpo che si muove ne incontra un altro più forte di sé, non perde nulla del suo movimento, e se ne incontra un altro più debole che egli possa muovere, ne perde tanto quanto gliene dà» (*Opere*, II, 86). Sulla base di questa terza legge un corpo in moto non potrebbe mettere in moto un altro corpo con cui entri in collisione che sia in quiete ed abbia una massa maggiore. Galilei si era reso conto con chiarezza che, qualunque sia la massa di un corpo in quiete, un corpo che lo colpisce, per quanto piccolo, gli conferirà sempre un movimento. Solo un corpo in quiete assoluta, cioè di massa infinita, potrebbe sottrarsi a un mutamento in conseguenza dell'urto. Nel *De motu corporum ex percussione* (composto nel 1677, ma pubblicato solo nel 1703) Christiaan Huygens rifiuterà le tesi cartesiane sull'urto. Sulla sua copia dei *Principia philosophiae* Newton annoterà *error*, *error* finché (come scrive Voltaire nella quindicesima delle *Lettres philosophiques*) «stanco di scrivere ovunque *error*, gettò via il libro».

Nella mia fisica, scrisse una volta Cartesio a Mersenne, «non c'è nulla che non sia anche nella mia geometria». Strettamente connessa alla geometria, la fisica cartesiana è fondata, come la geometria, su una serie di assiomi ed ha carattere strettamente deduttivo. La sua fisica (come ha chiarito lucidamente Alexandre Koyré), a differenza di quella di Galilei e di quella di Newton, non si pone mai la domanda: «quali sono i modi d'azione effettivamente seguiti dalla natura?». Si pone invece la domanda: «quali sono i modi d'azione che la natura *deve* seguire?» La concezione della fisica come geometria e del mondo come «geometria realizzata» condussero Cartesio verso una fisica «immaginaria», il cui carattere di «romanzo filosofico» verrà sottolineato non solo dal «cartesiano» Huygens e da Newton ma da critici innumerevoli. In moltissimi casi la connessione con l'esperienza, la ricerca di conferme empiriche delle teorie erano, nel sistema cartesiano, solo chimeriche. Le leggi cartesiane della natura (ha scritto ancora Koyré) sono leggi *per* la natura alle quali essa non può conformarsi perché sono esse che la costituiscono.

La grande costruzione cartesiana si presentava tuttavia — ed è questa una delle ragioni della sua straordinaria fortuna — come un *sistema*. Esso appariva fondato sulla ragione, escludeva definitivamente ogni ricorso a forme di occultismo e di vitalismo, sembrava in grado di connettere insieme (in una forma differente da quella che era stata realizzata dalla Scolastica medioevale) scienza della natura, filosofia naturale e religione, offriva infine,

in un'età piena delle incertezze che sono collegate alle grandi svolte intellettuali, un quadro coerente, armonico e completo del mondo. La penetrazione e la diffusione del cartesianesimo furono tuttavia lente e difficili, accompagnate da aspre polemiche. Bandita come si è visto dalle Università di Utrecht e Leida già nel corso degli anni Quaranta, la filosofia cartesiana fu condannata in tutti i Paesi Bassi da un editto del Sinodo di Dordrecht nel 1656. Nel 1663 anche la Chiesa cattolica poneva all'Indice gli scritti di Descartes *donec corrigantur*. Contro le tesi eterodosse sostenute da Henrik de Roy (Regius, 1598-1679) polemizzò lo stesso Cartesio. Posteriori alla rottura con il maestro sono i *Fundamenta physices* (1646) e la *Philosophia naturalis* (1654). Una straordinaria diffusione ebbe il *Traité de physique* (1671) di Jacques Rohault (1620-1675). Il *Système de philosophie* (1690) di Pierre Sylvain Regis (1632-1707) riesponeva in forma sistematica la filosofia e la fisica. In Italia il cartesianesimo si presentò congiunto con il gassendismo e il baconismo, con l'eredità di Telesio, di Campanella, di Galilei. Tommaso Cornelio (1614-1684) «fece venire in Napoli le opere di Renato delle Carte», si richiama a Cartesio nei *Progymnasmata physica* (1663, originariamente letti all'Accademia degli Investiganti) e sostenne tesi meccanicistiche nel *De sensibus* (1688). Leonardo di Capua (1617-1695) teorizza, nel *Parere sull'incertezza della medicina* (1681), il necessario congiungimento di scienza cartesiana e galileiana. Michelangelo Fardella (1650-1718) di Trapani insegna filosofia cartesiana a Padova fra il 1693 e il 1709.

Negli ultimi decenni del secolo il cartesianesimo aveva conquistato le università europee e le condanne erano cadute in desuetudine. Gli *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) di Bernard de Fontenelle (1657-1757) esponevano e divulgavano il copernicanesimo e la nuova cosmologia su uno sfondo rigidamente cartesiano. Fino a oltre la metà del secolo il suo autore difese ostinatamente i vortici e non volle mai piegarsi a registrare le scoperte di Newton. Molte delle principali tesi fisiche e biologiche di Cartesio erano state invece rielaborate e sottoposte a revisione dal padre Nicolas Malebranche (1638-1715) della Congregazione dell'Oratorio. Egli aveva corretto le tesi di Descartes relative alla estensione piena ed alla ghiandola pineale, aveva elaborato una dottrina dei «piccoli vortici» utilizzata in una teoria ottica che tenta di conciliare le tesi cartesiane con quelle di Huygens. L'interessamento per l'*Ottica* di Newton, la fitta corrispondenza con Leibniz sul tema delle forze vive trasformano i chiarimenti aggiunti nel 1687 alla *Recherche de la vérité* (originariamente pubblicata nel 1674-75) in un tentativo di ammodernamento del cartesianesimo di fronte alle scoperte ed acquisizioni più recenti dell'astronomia e della fisica. Anche se non mancano, come ad esempio nel caso della utilizzazione della terza legge di Keplero, errori clamorosi (Hall 1973, 284).

Le voci *Rorarius* e *Pereira* del grande *Dictionnaire historique et critique* (1695) di Pierre Bayle (1647-1707) sono uno straordinario documento della controversia sul materialismo che ha al suo centro la questione dell'anima delle bestie. Per tutta la seconda metà del Seicento la filosofia e la fisica di Cartesio restano al centro della cultura europea. Con la sua prospettiva si misurano Hobbes, Spinoza, Leibniz e con le sue tesi si confronteranno i grandi critici della filosofia cartesiana da Locke fino a Vico. La intensa discussione fra cartesianesimo e newtonianesimo si concluderà, con la sconfitta della fisica cartesiana, solo attorno al 1750.

Del fascino che la costruzione di Cartesio aveva esercitato sono una testimonianza eloquente le affermazioni contenute in una lettera scritta da Christiaan Huygens (1629-1695) a Bayle il 26 febbraio 1693. Descartes, afferma Huygens, ha trovato il modo di far accettare come vere le sue congetture e le sue finzioni. A coloro che leggono i suoi *Principia philosophiae* succedeva qualcosa di simile a ciò che capita a coloro che leggono dei bei romanzi e li scambiano per storie vere: «Quando lessi questo libro per la prima volta, mi sembrò che tutto andasse nel migliore dei modi, e quando incontravo qualche difficoltà, credevo che ciò dipendesse dal fatto che non avevo ben compreso il pensiero dell'autore. Avevo allora quindici o sedici anni... Ora non trovo quasi più nulla da approvare come vero in tutta la sua fisica, né nella sua metafisica, né nelle sue meteore» (*Oeuvres*, X, 403).

I ricordi autobiografici scritti in tarda età da filosofi e da scienziati tendono spesso a semplificare vicende intellettuali complicate e ricche di sfumature. Huygens aveva studiato all'Aja e a Leida con maestri cartesiani. A Parigi e a Londra era poi entrato in contatto con gli ambienti di Mersenne e con i «virtuosi» della Royal Society. Nella sua attività si saldano assieme raffinate ricerche teoriche di matematica e di meccanica e interessi per la tecnica e per le macchine che lo collegano alla tradizione baconiana e galileiana. Fatta eccezione per l'ottica esposta nel *Traité de la lumière* (1690), Huygens restò, nella sostanza, profondamente legato al meccanicismo nel senso cartesiano del termine. Le prese di posizione antinewtoniane contenute nel *Discours sur la cause de la pesanteur* (1690) nascono su questo terreno.

A differenza di Huygens, Descartes aveva scritto tutta la sua fisica senza impiegare formule e non si era servito del linguaggio della matematica. La sua fisica non conteneva leggi espresse matematicamente, la sua (come è stato più volte ripetuto) era una fisica matematica senza matematica. Il «matematismo» cartesiano si manifestava solo nel carattere assiomatico e deduttivo della sua costruzione del mondo. Il titolo stesso del libro di Isaac Newton *Philosophiae naturalis principia mathematica* (pubblicato a Londra nel 1687) esprimeva una presa di posizione polemica nei confronti della fisica di

Cartesio e dei cartesiani. Newton presentava in linguaggio matematico i principi della filosofia naturale e, al tempo stesso, faceva propria la grande lezione dello sperimentalismo di Bacone, di Hooke, di Boyle.

3. *La filosofia meccanica.*

Come tutti gli *ismi* anche il termine meccanicismo ha finito per assumere un significato molto vago. Usando questo termine in riferimento allo sviluppo della scienza moderna pensiamo al significato di *ordigno* o *macchina* presente nel termine greco *mechané*? a una visione del mondo che considera l'universo come una grande macchina ed eventualmente gli esseri umani come macchine? oppure intendiamo riferirci al fatto che gli eventi naturali che costituiscono il mondo possono venir descritti e interpretati mediante i concetti e i metodi di quel ramo della scienza che viene detto *meccanica* e che è la scienza dei movimenti? E.J. Dijksterhuis, che si è posto queste domande, ritiene che la meccanica, come parte della fisica, si fosse pienamente emancipata, nel Seicento, dalla sua origine pratica e dal suo legame con le macchine. La meccanica, in altri termini, si sviluppa come un settore indipendente della fisica matematica che tratta del moto e che trova nella teoria delle macchine solo una delle sue molte applicazioni pratiche. Da questo punto di vista, se la meccanica avesse lasciato cadere il suo nome storico e si fosse chiamata *cinetica* o studio dei moti e se si parlasse di matematizzazione anziché di meccanizzazione della natura, si potrebbero evitare molti equivoci e fraintendimenti.

Ma è sempre difficile risolvere i problemi storici sul piano dei fraintendimenti o su quello degli equivoci linguistici. Quando si considerano i testi del Seicento scritti da sostenitori (o dagli avversari) della filosofia corpuscolare o della filosofia meccanica, si ha quasi sempre l'impressione che *entrambi i significati* ai quali Dijksterhuis faceva riferimento siano presenti, spesso combinati o mescolati insieme, nella nuova visione meccanica del mondo. Tale visione è fondata su tre presupposti: 1) la natura non è la manifestazione di un principio vivente, ma è un sistema di materia in movimento retto da leggi; 2) tali leggi sono determinabili con precisione matematica; 3) un numero assai ridotto di tali leggi è sufficiente a spiegare l'universo. Sulla base di questi presupposti *spiegare* un fenomeno vuol dire costruire un modello meccanico che «sostituisce» il fenomeno reale che si intende analizzare. Questa ricostruzione è tanto più «vera» (tanto più adeguata al mondo «reale») quanto più il modello sarà stato costruito solo mediante elementi quantitativi e tali da poter essere ricondotti alle formulazioni della geometria.

Nella filosofia meccanica la realtà viene dunque ricondotta ad una relazione di corpi o particelle materiali in movimento e tale relazione appare

interpretabile mediante le leggi del moto individuate dalla statica e dalla dinamica. L'analisi viene ricondotta alle condizioni più semplici e viene realizzata mediante un processo di astrazione da ogni elemento sensibile e qualitativo. *Fatti* appaiono alla scienza solo quegli elementi del mondo reale che vengono raggiunti in base a precisi criteri di carattere teorico. L'interpretazione dell'esperienza avviene sulla base di tesi prestabilite: la resistenza dell'aria, l'attrito, i differenti comportamenti dei singoli corpi, gli aspetti qualitativi del mondo reale vengono interpretati come irrilevanti per il discorso della filosofia naturale o come *circostanze disturbanti* delle quali non si tiene (e non si deve tenere) conto nella spiegazione del mondo. I fenomeni nella loro particolarità e nella loro immediata concretezza, il mondo delle cose «curiose e strane» al quale si era volto con tanto appassionato interesse il naturalismo rinascimentale, non esercita più alcun fascino sui sostenitori della filosofia meccanica.

Il mondo immediato dell'esperienza quotidiana *non è reale*. Reali sono la materia e i movimenti (che avvengono secondo leggi) dei corpuscoli che costituiscono la materia. Il mondo reale è contesto di dati quantitativi e misurabili, di spazio e di movimenti e relazioni nello spazio. Dimensione, forma, stato di movimento dei corpuscoli (per alcuni anche l'impenetrabilità della materia) sono le sole proprietà riconosciute insieme come reali e come principi esplicativi della realtà. La tesi della distinzione fra le qualità *oggettive* e *soggettive* dei corpi è variamente presente in Bacone e Galilei, in Descartes e Pascal, in Hobbes e Gassendi e Mersenne. Essa costituisce uno dei fondamentali presupposti teorici del meccanicismo e assumerà, nella filosofia di John Locke (1632-1704), la forma della celebre distinzione fra qualità *primarie* e qualità *secondarie*. Quella dottrina serve anche alla interpretazione e spiegazione delle qualità secondarie. Come scrive Thomas Hobbes (1588-1679) nel *Leviathan or the matter, form, and power of a Commonwealth ecclesiastical and civil* (1651): «tutte le qualità chiamate sensibili sono, nell'oggetto che le determina, i vari moti della materia, mediante i quali essa influenza diversamente i nostri organi. In noi, che siamo egualmente stimolati, esse non sono altro che diversi moti, poiché il movimento non può produrre che movimento, ma la loro apparenza è in noi immaginazione... Così il senso, in ogni caso, non è altro che una immaginazione originaria causata dallo stimolo, cioè dal moto esercitato dalle cose esterne sopra i nostri occhi, orecchi e altri organi analoghi» (Hobbes 1955, 48-50). Anche le qualità secondarie risultano meccanizzate *ex parte obiecti* ed è riconducibile ad un modello meccanico anche il fenomeno della sensazione.

Per questa via, proprio mentre si eliminava dalla visione scientifica del mondo ogni forma di antropomorfismo, si realizzava il tentativo di allargare il metodo della filosofia meccanica dal mondo dei fenomeni naturali a quello

dei fenomeni fisiologici e psicologici. Fisiologia e psicologia tendono a diventare scienze «naturali» interpretabili con gli stessi metodi e sulla base degli stessi presupposti teorici che hanno mostrato la loro straordinaria fecondità nella fisica e nella meccanica. Le teorie della percezione appaiono fondate sull'ipotesi di particelle che, attraverso porosità, penetrano negli organi di senso producendo dei moti che vengono trasmessi dai nervi al cervello.

Poiché il meccanicismo implicava (era fondato su) una nuova immagine della natura ed una nuova immagine della scienza, esso giunse ad investire anche il terreno dell'etica e della politica. Una *fisica celeste* — scrive Hobbes nell'epistola dedicatoria al *De corpore* (1655) — fu escogitata da Pitagora e da Filolao ma fu in seguito «strangolata dai lacci verbali dei filosofi». L'inizio dell'astronomia risale a Copernico che si richiamò a quegli antichi. Galilei, lottando contro la difficile questione della caduta dei gravi, «per primo ci aprì la porta di tutta la fisica». Harvey ha scoperto e dimostrato la scienza del corpo umano, Keplero, Gassendi e Mersenne hanno dato un impulso decisivo alla astronomia e alla fisica. Ma «se la fisica è cosa nuova, la filosofia civile lo è ancora di più, dato che non è più antica del libro *De cive* che io stesso ho scritto». Quell'opera, pubblicata nel 1642, veniva collocata da Hobbes accanto a quella dei grandi padri della nuova scienza. La sua insistenza sul carattere *artificiale* dello Stato che è una sorta di «animale artificiale creato per mezzo dell'arte» collocava anche la politica sotto il segno della filosofia meccanica.

Anche in un astronomo come Keplero, così fortemente legato ai temi dell'ermetismo, abbiamo riscontrato la presenza del riferimento alla macchina e dell'analogia fra la macchina e l'universo: la macchina dell'universo non è simile a un divino essere animato, ma è simile a un orologio e in essa tutti i vari movimenti dipendono da una semplice forza attiva materiale, così come tutti i moti dell'orologio sono dovuti semplicemente al pendolo. Anche per Boyle l'universo è simile ad «una grande macchina semovente». Che cos'è il cuore se non una molla, i nervi se non molte corde, le articolazioni se non molte ruote? si domanda Hobbes (1955, 40). Le macchine del nostro corpo — afferma Marcello Malpighi (1628-1694) nel *De pulmonibus* (1689) — sono le basi della medicina: esse si identificano con «corde, filamenti, travi, fluidi scorrenti, cisterne, canali, feltre, crivelli e somiglianti macchine» (Malpighi 1944, 40). Aveva scritto Cartesio ne *L'homme* (1644, ma terminato nel 1633): «Vediamo che orologi, fontane artificiali, mulini e altre macchine di questo genere, pur essendo costruite da uomini, non mancano della forza di muoversi da sole in modi diversi... E invero si possono benissimo paragonare i nervi ai tubi delle macchine di quelle fontane, i suoi muscoli e i suoi tendini agli altri congegni e molle che servono a muoverle».

Con i loro riferimenti agli orologi, ai mulini, alle fontane questi testi ci riconducono al secondo dei due aspetti della filosofia meccanica che sono stati sottolineati all'inizio di questo paragrafo. La riflessione sulle macchine non può andare disgiunta in modo rigoroso (come alcuni hanno cercato di fare) dalla nascita e dal rafforzarsi della visione meccanicistica del mondo.

4. *Animali, uomini, macchine.*

Nella fisiologia (o psico-fisiologia) di Descartes (esposta nella quinta parte del *Discours de la méthode* e nel *De l'homme*) ciò che è *vivente* non si pone più come alternativo o contraddittorio rispetto a ciò che è *meccanico*. Gli animali sono macchine (cfr. il cap. XIII di questo volume). Il riconoscimento dell'esistenza di un'anima razionale serve a tracciare una linea di demarcazione non tra le macchine e gli organismi viventi, ma tra le macchine-viventi ed alcune particolari funzioni di quelle particolari macchine (uniche nell'universo) che sono gli uomini le quali sono, esse sole, in grado di «pensare» e di «parlare». Solo queste due funzioni appaiono, assumendo il modello della macchina, non spiegate o non spiegate completamente.

Una macchina che avesse gli organi e l'aspetto di una scimmia o di un altro animale avrebbe bisogno, in corrispondenza di ogni particolare azione, di «una certa particolare disposizione dei suoi organi». Una macchina che abbia tanti e così diversi organi da poter agire in ogni circostanza della vita così come ci fa agire la nostra ragione non è, per Cartesio, concepibile. In moltissime cose quelle macchine potrebbero agire anche *meglio* di noi, ma in altre cose esse «fallirebbero inevitabilmente». La saggezza o la capacità di adattarsi all'ambiente non sono dunque, per Cartesio, doti che le macchine possano acquisire. E lo stesso vale per il linguaggio. Perché si potrebbero certo costruire macchine capaci di pronunciare parole e di reagire con parole a determinati stimoli esterni, ma le macchine sarebbero in ogni caso «incapaci di coordinare variamente le parole per rispondere al significato di ciò che viene loro detto» (*Discours*, V).

L'anima ragionevole non può quindi derivare dalla potenza della materia, ma è stata appositamente creata da Dio. Tutto ciò (e non è davvero poco) che sta al di sotto della soglia del pensiero e del linguaggio è invece interpretabile secondo i canoni del più rigido meccanicismo. Gli animali sono *solo* macchine e tutta la vita fisiologica dell'uomo è spiegabile con la metafora della macchina e può essere ricondotta alla macchina. In quella vita, in primo luogo, è possibile distinguere tra ciò che è volontario e ciò che è puramente meccanico. Nell'uomo, l'anima ha la sua sede nella ghiandola pineale, vicina alla base del cervello, ed essa controlla quei moti muscolari

che trasformano i pensieri in azioni e in parole. La respirazione, lo starnuto, lo sbadiglio, il tossire, i moti peristaltici dell'intestino, le contrazioni della pupilla e della laringe nella deglutizione sono «azioni naturali e ordinarie» che dipendono dal «corso degli spiriti». Questi ultimi, «simili a un vento o a una fiamma sottilissima», scorrono rapidamente attraverso quei sottilissimi tubi che sono i nervi e provocano meccanicamente la contrazione dei muscoli. La sola forza degli spiriti animali che scorrono dal cervello nei nervi è in grado di spiegare questo tipo di movimenti: così come avviene quando una fiamma brucia un piede (ritiro del piede, grido di dolore e spostamento dello sguardo) oppure nel caso delle teste appena mozzate che continuano a muoversi e mordono la terra.

Queste azioni sono in tutto simili ai moti di un mulino o di un orologio. Per la costruzione della sua «metafora» delle azioni volontarie, Cartesio fa riferimento ad una macchina più complicata. Essa è una delle complicate «fontane» dei giardini del Re (una specie di Disneyland del secolo XVII) nelle quali la sola azione dell'acqua basta ad azionare una serie di macchine differenti, a far suonare degli strumenti, a far pronunciare alcune parole. I nervi sono i tubi della fontana, i muscoli e i tendini sono le molle e i congegni che la muovono, gli spiriti animali sono l'acqua che la mette in movimento, il cuore è la sorgente di quell'acqua e le cavità del cervello ne sono i serbatoi. Gli oggetti esterni che stimolano gli organi di senso sono coloro che, aggirandosi all'interno della complicata fontana, provocano, senza saperlo, i movimenti delle macchine che la compongono: avvicinandosi ad una Diana al bagno (che hanno fatto comparire camminando su certe mattonelle) fanno per esempio comparire all'improvviso un Nettuno che li minaccia con un tridente. L'anima ragionevole, posta nel cervello, «ha la funzione dell'addetto alla fontana che deve trovarsi accanto ai serbatoi dove terminano tutti i tubi di queste macchine per provocare, impedire o cambiare in qualche modo i loro movimenti».

Cartesio ha chiara la distinzione fra processi fisiologici volontari e involontari; ha una precisa idea di quel fenomeno che fu successivamente (e in un contesto esplicativo molto diverso) denominato «atto riflesso»; apre la via al meccanicismo biologico degli iatromeccanici e alla progressiva sostituzione dei metodi della chimica e della fisica ai principi vitali della tradizione vitalistica. Utilizza i risultati della fisiologia di Harvey e li inserisce in un diverso contesto. Ma è anche possibile affermare che «la fisiologia di questo radicale innovatore rappresenta un reazionario passo indietro rispetto a quella del conservatore aristotelico Harvey». La sua fisiologia è in realtà una forma di galenismo tradotto nel linguggio della filosofia meccanica (Westfall 1984, 117).

Quella «traduzione» godrà di una straordinaria fortuna. E inoltre

«l'addetto alla fontana» assomigliava abbastanza a un meccanismo di autoregolazione. Come risulterà ben chiaro all'occhio attento del gesuita Gabriel Daniel che scriverà nel 1703: «Ogni cartesiano dovrebbe affermare, con la stessa serietà con cui lo afferma per gli animali, che anche gli esseri umani sono delle macchine».

Anche il matematico e astronomo napoletano Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679) parla di una somiglianza fra automi e animali semoventi e si richiama alla geometria e alla meccanica come a due scale «attraverso le quali si può raggiungere la meravigliosa scienza del moto degli esseri viventi». Entrato a contatto con Torricelli e con gli esponenti della scuola galileiana forse per merito di Tommaso Campanella (che alcuni ritennero suo padre), Borelli fu, a Messina, uno degli animatori dell'Accademia della Fucina. L'*Euclides restitutus* (1658) è la prima testimonianza dei suoi interessi matematici. Il suo passaggio a studi di medicina avviene con il trattato *Delle cagioni delle febri maligne della Sicilia negli anni 1647 e 1648* nel quale si avanza la tesi del carattere curativo dei processi febbrili e che mostra l'influenza del gassendismo nella trattazione dei contagi ad opera di esalazioni tossiche. Prima professore di matematica a Pisa, Borelli lavora poi a Firenze con gli studiosi dell'Accademia del Cimento. Del 1666 sono le *Theoricae mediceorum planetarum* nelle quali viene avanzata la tesi (della quale Newton riconoscerà la genialità nel *De mundi systemate*) secondo la quale i pianeti si mantengono nelle loro orbite a causa della combinazione di tre forze: una «forza innata di gravità», una forza tangenziale all'orbita prodotta dalla luce del Sole in rotazione, una forza centrifuga che impedisce al pianeta di cadere sul Sole. Dopo aver partecipato, a Messina, a una congiura antispagnola, Borelli lavorò nell'ambiente dell'Accademia romana della regina Cristina di Svezia. Terminò a Roma la sua vita, dimenticato da tutti.

Un anno dopo la morte, nel 1680-81, vedeva la luce a Roma la sua opera maggiore: il *De motu animalium*. In esso sono presenti richiami ad Harvey, a temi svolti da Galilei nei *Discorsi*, alle impostazioni cartesiane. I movimenti degli animali nel camminare, correre, saltare, sollevare pesi, nonché il volo degli uccelli e il nuoto dei pesci vi vengono studiati dal punto di vista geometrico-meccanico, come sistemi di macchine semplici. Le due parti in cui l'opera è divisa studiano rispettivamente i moti esterni o evidenti dei corpi e i moti interni dei muscoli e dei visceri, alcuni dei quali non dipendono dalla volontà dell'individuo. Il corpo si configura come una macchina idraulica nella quale gli spiriti animali che passano attraverso i nervi esercitano la funzione dell'acqua. Nella grande maggioranza dei casi, i muscoli lavorano in condizione di notevole svantaggio: se le ossa costituiscono una leva che ha il suo fulcro nell'articolazione, la forza esercitata dal

muscolo agisce molto vicino al fulcro mentre il peso (per esempio in un braccio disteso che sorregge un peso) è vicino all'estremità di un braccio di leva che è dieci o venti volte maggiore della piccola leva rappresentata dal muscolo. Lo sforzo eccede di molte volte il peso.

Borelli muove da presupposti di tipo galileiano-cartesiano: «la lingua e i caratteri con i quali il Creatore delle cose parla nelle sue opere sono configurazioni e dimostrazioni geometriche» (*De motu*, I, a3r); «le operazioni della natura sono facili, semplici e seguono le leggi della meccanica, che sono leggi necessarie» (*De motu*, II, 3). Sulla base di questi presupposti egli respinge ogni interpretazione chimica dei fenomeni fisiologici e interpreta su basi puramente meccaniche i processi dell'intero organismo, ivi compresi la circolazione del sangue, il battito cardiaco, la respirazione, la funzione esercitata dai reni. Solo relativamente al rigonfiamento e alla contrazione dei muscoli ammette l'idea che processi di tipo chimico abbiano luogo all'interno del corpo. La forza contrattiva propria della struttura materiale delle fibre muscolari è, per se stessa, debolissima e non può dar luogo al sollevamento di pesi ingenti mediante la contrazione: quel sollevamento «deve avvenire per una forza esterna diversa dalla forza materiale della macchina che la contrae violentemente» (*De motu*, II, 3). Di fronte alle cause misteriose è da approvare «una confessione di ignoranza piena di candore», ma non è neppure il caso di rinunciare a ricercare le «cause probabili dei fenomeni naturali». Bisogna cercare di andare più oltre e di «congetturare ipoteticamente» intorno alle cose i cui congegni non sono visibili con gli occhi. Fra coloro che ritengono sia lecito tutto osare in filosofia e coloro che fanno troppo presto professione di ignoranza è necessario trovare un giusto equilibrio. Anche se resta vero (come verrà autorevolmente affermato cinque anni più tardi) che non dobbiamo fingere ipotesi: «non enim hypotheses fictas admittere debemus» (*Ibid.*).

Nel *De venarum ostiolis* (1603) Girolamo Fabrici d'Acquapendente (1537-1619) aveva paragonato le «membrane» presenti nelle vene agli ostacoli che i costruttori di mulini pongono lungo il corso dell'acqua al fine di trattenerla e accumularla per i congegni della macinatura. Quelle stesse «chiusure» o «dighe» sono presenti nelle vene. Gabriel Harvey sostituì al concetto di *chiusa* quello di *valvola* sulla base di un differente modello di macchina: la *pompa* al posto del *mulino*. I modelli meccanici e idraulici ebbero effetti decisivi anche nello studio del corpo umano. La voce *méchanicien* della grande enciclopedia di Diderot e D'Alembert coglieva con chiarezza anche questo aspetto: «dopo la scoperta della circolazione del sangue e l'affermarsi della filosofia di Descartes, i medici moderni hanno scosso il giogo dell'autorità e hanno adottato il metodo dei geometri». Essi considerano l'economia animale come una produzione di moti tutti sotto-

posti alle leggi della meccanica: «il corpo animale, e di conseguenza il corpo umano, è qui considerato come una macchina vera e propria». Probabilmente i malati non venivano curati molto meglio che per il passato, ma era certamente vero che «la medicina [aveva] preso un aspetto completamente nuovo, un linguaggio del tutto diverso da quello che finora era stato impiegato».

5. *Il conoscere come fare.*

Se il mondo è simile a una macchina, nella natura non sono più presenti *gerarchie*, come quando ci si serviva dell'immagine di una *piramide* che aveva alla base le cose meno nobili e al vertice l'uomo simile a Dio. Tutti i fenomeni, così come tutti i pezzi che servono al funzionamento della macchina, sono egualmente necessari ed hanno (rispetto al fine rappresentato da quel funzionamento) lo stesso identico valore. La macchina che funziona nel meccanicismo come modello esplicativo può essere una macchina reale o una macchina *pensata come possibile*. In ogni caso essa appare come l'immagine più adeguata di una realtà nella quale ogni elemento (ogni pezzo della macchina) adempie una funzione che dipende da una determinata forma, da determinati movimenti e velocità di movimenti. Conoscere la realtà vuol dire rendersi conto dei modi in cui funzionano le macchine che operano all'interno della più grande macchina del mondo. E le macchine possono sempre, almeno in teoria, essere smontate nei loro singoli elementi per essere poi, pezzo per pezzo, ricomposte.

Nel *Syntagma philosophicum* (1658) di Pierre Gassendi (1592-1655), canonico a Digne, professore di astronomia e matematica, autore di sottili obiezioni alle *Meditationes* di Descartes, troviamo enunciato con molta chiarezza questo tema: «Sulle cose della natura, indaghiamo allo stesso modo in cui indaghiamo sulle cose di cui noi stessi siamo gli autori... Facciamo uso dell'anatomia, della chimica e di simili sussidi in modo da capire, risolvendo per quanto si può i corpi e come scomponendoli, di quali elementi e secondo quali criteri essi sono composti e per vedere se, con altri criteri, altri abbiano potuto o possano essere composti» (*Opera*, I, 122b-123a). Critico del dogmatismo degli aristotelici, degli occultisti, dei cartesiani, Gassendi era vicino a posizioni libertine e teorizzava uno scetticismo metafisico che costituiva la premessa per l'accettazione consapevole del sapere «limitato» della scienza. Le uniche realtà di cui si possa avere scienza sono: 1) il mondo dei fenomeni ricostruibili mediante l'analisi scientifica; 2) il mondo costituito da quei prodotti artificiali che sono stati costruiti dalle mani o che appaiono ricostruibili dall'intelletto. Gassendi si richiamava all'etica epicurea e all'atomismo lucreziano e tentava di mostrare la conciliabilità di queste posizioni

filosofiche con il cristianesimo. Anche molti di coloro che non condividevano affatto questo suo audace tentativo di conciliazione, condividevano invece una sua tesi centrale: la nuova scienza non è interessata né alle scolastiche *quidditates rerum* né agli *arcana naturae* dei maghi del Rinascimento: è conoscenza fenomenica del mondo.

La tesi relativa alla efficacia della scienza si congiungeva a quella di una sua limitazione: il sapere scientifico non è un sapere di essenze. Se possiamo *veramente conoscere* o le macchine o il mondo reale in quanto esso sia interpretabile come una macchina, questa limitazione al piano dei fenomeni (o di ciò che appare) comporta però anche il rovesciamento di quelle dottrine relative al rapporto arte-natura che avevano largamente dominato la cultura. L'affermazione di una sostanziale non diversità fra i prodotti dell'arte e quelli della natura si contrappone infatti decisamente alla tradizionale definizione dell'arte che *imita* la natura nelle sue produzioni. Entro la dottrina medioevale della *imitatio naturae* ogni pretesa dell'arte di raggiungere la perfezione della natura appariva un segno di empietà: l'arte è solo un tentativo di contraffare la natura nei suoi movimenti e le arti meccaniche sono *adulterinae* perché prendono a prestito dalla natura i loro movimenti. Questa dottrina appare a Francis Bacon legata alla teoria aristotelica della specie per la quale un prodotto della natura (un albero) è qualificato come avente una *forma primaria*, mentre al prodotto dell'arte (per esempio il tavolo ricavato da quell'albero) spetterebbe solo una *forma secondaria*. Questa dottrina, scrive Bacone nel *De augmentis*, «ha introdotto nelle imprese umane una prematura disperazione; al contrario gli uomini dovrebbero persuadersi di questo: le cose artificiali non differiscono dalle cose naturali per la forma o l'essenza, ma solo per la causa efficiente» (*Works*, I, 426). Il fulmine, che gli antichi negavano potesse essere imitato, è stato di fatto imitato dalle artiglierie dell'età moderna. L'arte non è *simia naturae* (scimmia della natura) e non è, come voleva un'antica tradizione medioevale, «in ginocchio davanti alla Natura». Su questo punto è esplicito anche Descartes: «Non si dà alcuna differenza fra le macchine che costruiscono gli artigiani e i diversi corpi che la natura compone». L'unica differenza è che i congegni delle macchine costruite dall'uomo sono ben visibili, mentre «i tubi e le molle che costituiscono gli oggetti naturali sono generalmente troppo piccoli per poter essere percepiti dai sensi» (*Oeuvres*, XI, 21).

All'immagine platonica del Dio *geometra* si accompagna, com'è noto, l'immagine del Dio *meccanico* e *orologiaio*, costruttore della perfetta macchina del mondo. La conoscenza delle cause ultime e delle essenze, negata all'uomo, è riservata a Dio in quanto creatore e costruttore della macchina del mondo. Il criterio del *conoscere come fare* o della identità fra

conoscere e costruire (o ricostruire) vale non solo per l'uomo, ma anche per Dio.

Ciò che davvero l'uomo può conoscere è solo ciò che è artificiale. Nei limiti in cui la natura non è concepita come artificiale, essa si presenta come una realtà inconoscibile. La tesi della limitazione della conoscenza al piano dei fenomeni si congiunge all'antica tesi del carattere sempre e necessariamente ipotetico e congetturale della fisica. «È difficile, scrive per esempio Marin Mersenne, incontrare delle verità nella fisica. Appartenendo l'oggetto della fisica alle cose create da Dio, non c'è da stupirsi se non possiamo trovare le loro vere ragioni... Conosciamo infatti le vere ragioni solo di quelle cose che possiamo costruire con le mani o con l'intelletto» (Mersenne 1636, 8). Il materialista Hobbes è certo su posizioni molto dissimili da quelle di Mersenne, ma giunge su questo punto a conclusioni in tutto simili: «La geometria è dimostrabile perché le linee e le figure a partire dalle quali ragioniamo sono tracciate e descritte da noi stessi. E la filosofia civile è dimostrabile perché noi stessi costruiamo lo Stato. Poiché tuttavia non conosciamo la costruzione dei corpi naturali, ma la ricerchiamo dai loro effetti, non v'è alcuna dimostrazione di quali siano le cause da noi cercate, ma solo di quali possano essere» (Hobbes 1839, 92-94).

Il passo di Hobbes ora ricordato è stato molte volte avvicinato alle pagine di Giambattista Vico (1668-1744) nelle quali è enunciato il celebre principio del *verum-factum*. «Dimostriamo le proposizioni geometriche perché le facciamo, se potessimo dimostrare quelle della fisica le faremmo», scriverà nel *De nostri temporis studiorum ratione* (1709). L'aritmetica e la geometria — troviamo scritto nel *De antiquissima* (1710) — «nonché quella loro filiazione che è la meccanica, sono nella verità dell'uomo, giacché in questi tre campi noi in tanto dimostriamo una verità in quanto la facciamo». Nella *Scienza nuova* (1725 e 1744) il mondo della storia verrà interpretato come oggetto di una nuova scienza proprio perché integralmente fatto e costruito dagli uomini: «in cotal lunga e densa notte di tenebre quest'una sola luce barluma: che 'l mondo delle gentili nazioni egli è stato pur certamente fatto dagli uomini» (Vico 1957, 781).

Nel momento stesso in cui la tesi della identità fra conoscere e fare dava luogo ad una rinuncia alla possibilità di una comprensione delle essenze o delle cause ultime della natura, nel momento stesso in cui veniva utilizzata come un riconoscimento dei limiti del sapere scientifico, essa finiva per investire (con conseguenze che sarebbe difficile sottovalutare) il mondo della morale, della politica, della storia.

6. *Dio e il meccanicismo.*

I maggiori filosofi naturali del Seicento che si fecero sostenitori e propagandisti del meccanicismo ammiravano Lucrezio e gli antichi atomisti perché avevano costruito un'immagine del mondo di tipo meccanico e corpuscolare. Ma dalle conseguenze empie o «ateistiche» che si potevano ricavare dalla tradizione del materialismo intendevano mantenersi, nella grandissima maggioranza dei casi, accuratamente lontani rifiutando le posizioni che ascrivevano l'origine del mondo al caso e al fortuito concorso degli atomi. L'immagine della macchina del mondo implicava per essi l'idea di un suo Artefice e Costruttore, la metafora dell'orologio rinviava al divino Orologiaio. Lo studio accurato e paziente della grande macchina del mondo era la lettura del Libro della Natura, da affiancare a quella del Libro della Scrittura. Entrambe le indagini tornavano a gloria di Dio.

I filosofi dai quali prendere le distanze, innumerevoli volte respinti e condannati, sono Thomas Hobbes (1588-1679) e Baruch Spinoza (1632-1677). Il primo ha esteso il meccanicismo all'intera vita psichica, ha concepito il pensiero come una sorta di istinto un po' più complicato di quello degli animali, ha ricondotto al movimento tutte le determinazioni e trasformazioni di una realtà intesa esclusivamente come corpo. Facendo dell'estensione un «attributo» di Dio, Spinoza ha empiamente negato la millenaria distinzione fra un mondo materiale e un Dio immateriale, ha negato che Dio sia persona e che possa avere scopi o disegni. Ha affermato che questi sono solo la grossolana proiezione in Dio di esigenze antropomorfiche. Ha affermato la inseparabilità di anima e di corpo. Ha visto nell'universo una macchina eterna, priva di senso e di scopi, che è espressione di una causalità necessaria e immanente.

Termini come *hobbista*, *spinozista*, *ateo*, *libertino* funzionano, nella cultura del secondo Seicento e del primo Settecento, come sinonimi. Le tesi più radicali del movimento libertino trovano la loro maggiore espressione nel *Theophrastus redivivus* (composto intorno al 1666) che ha diffusione larghissima. Attraverso quel tramite sotterraneo, il naturalismo rinascimentale, i temi empi della tradizione del magismo e dell'ermetismo, si collegano (attraverso il richiamo insistente a Giordano Bruno) alla filosofia antinewtoniana e antideistica di John Toland (1670-1722) e, più tardi, all'opera dei grandi materialisti francesi del Settecento.

Pierre Gassendi, si è visto, anche se pone gli atomi creati da Dio, apparve a molti pericolosamente vicino alle posizioni dei libertini. Contro i libertini polemizza apertamente ne *L'impiété des déistes* (1624) Marin Mersenne (1588-1648). Egli abbandona la tradizione del pensiero scolastico e si schiera decisamente dalla parte della nuova scienza: quest'ultima gli appare

come un argine di fronte ai pericoli grandissimi che sono rappresentati, per il pensiero cristiano e il suo patrimonio di valori, dalla ripresa dei temi «magici», dalla diffusione della tradizione ermetica, dalla presenza di posizioni che si richiamano al naturalismo rinascimentale e alle dottrine presenti nel *De incantationibus* (1556) e nel *De fato* (1567) di Pietro Pomponazzi (1462-1525) ove si negava l'esistenza dei miracoli e si sosteneva (questa tesi era presente nel *De immortalitate* del 1516) che le tre grandi religioni mediterranee erano state fondate, per scopi politici dai tre «impostori» Mosè, Cristo e Maometto.

Mersenne riteneva che esistesse una radicale incompatibilità fra cristianesimo e naturalismo, che il meccanicismo potesse essere conciliato con la tradizione cristiana e che la tesi del carattere sempre ipotetico e congetturale delle conoscenze lasciasse il necessario spazio alla dimensione religiosa e alla verità cristiana. Anche Robert Boyle (1627-1691) ha preoccupazioni di questo tipo. Nel momento in cui esalta l'eccellenza della filosofia corpuscolare o meccanica (*About the Excellency and Grounds of the Mechanical Hypothesis*, 1655), egli si preoccupa di tracciare due linee di demarcazione. La prima deve distinguerlo dai seguaci di Epicuro e di Lucrezio, da tutti coloro che ritengono che gli atomi, «incontrandosi insieme per caso in un vuoto infinito siano in grado da se stessi di produrre il mondo e i suoi fenomeni». La seconda serve a differenziarlo dai meccanicisti moderni (vale a dire dai cartesiani). Per questi ultimi, supposto che Dio abbia introdotto nella massa totale della materia una quantità invariabile di moto, le varie parti della materia, in virtù dei loro propri movimenti, sarebbero in grado di *organizzarsi da sole in un sistema*. La filosofia corpuscolare o meccanica della quale Boyle si fa sostenitore non va pertanto confusa né con l'epicureismo né con il cartesianesimo. Nel meccanicismo di Boyle il problema della «prima origine delle cose» va tenuto accuratamente distinto da quello del «successivo corso della natura». Dio non si limita a conferire il moto alla materia, ma guida i movimenti delle singole parti di essa in modo da inserirle nel «progetto di mondo» che avrebbero dovuto formare. Una volta che l'universo è stato strutturato da Dio e che Dio ha stabilito «quelle regole del movimento e quell'ordine fra le cose corporee che siamo soliti chiamare Leggi di Natura», si può affermare che i fenomeni «sono fisicamente prodotti dalle affezioni meccaniche delle parti della materia e dalle loro reciproche operazioni secondo le leggi della meccanica». La distinzione fra *origine delle cose* e *successivo corso della natura* è molto importante: coloro che indagano sulla prima elaborano ipotesi sull'origine dell'universo, hanno l'empia pretesa di «dedurre il mondo», di costruire ipotesi e sistemi. Gli epicurei e i cartesiani rappresentano la versione atea e materialistica della filosofia meccanica.

Cos'altro aveva fatto Descartes nel trattatello intitolato *Le monde ou traité*

de la lumière se non descrivere la nascita del mondo? Non aveva egli in tal modo presentato un racconto alternativo a quello della *Genesi*? Certo Cartesio presentava la sua descrizione della nascita del mondo come una «favola» e affermava di parlare di un universo immaginario. Ma, con un procedimento che gli è caratteristico, egli rovesciava in più punti questo senso del suo discorso: conoscendo la formazione del feto nel ventre materno, conoscendo come le piante escono dai semi, conosciamo qualcosa di più che conoscendo solo un bambino o una pianta così come sono. Lo stesso, affermava Cartesio (*Principia*, III, 4), vale per l'universo. La scienza è in grado di dire qualcosa non solo su cosa è il mondo, ma anche sul processo della sua formazione. L'alternativa con Boyle è, su questo punto, radicale. Le leggi di natura, aveva scritto Cartesio nel sesto capitolo de *Le Monde*, «basteranno a far sì che le parti del Caos arrivino a districarsi da sé, disponendosi in bell'ordine, così da assumere la forma di un mondo perfettissimo». Le strutture del mondo presente, nella prospettiva cartesiana, sono il risultato della materia, delle leggi della materia, del tempo.

Di fronte a queste dottrine e a queste soluzioni, la posizione di Isaac Newton (1642-1727) non sarà lontana da quella che aveva assunto Robert Boyle. Fino dagli anni della giovinezza Newton utilizza le obiezioni anticartesiane avanzate da Henry More (1614-1687) e da Pierre Gassendi: «Se affermiamo, con Cartesio, che l'estensione è corpo, non apriamo forse la via all'ateismo? Ciò per due ragioni: perché l'estensione risulta increata ed eterna, e perché in certe circostanze potremmo concepirla come esistente e insieme immaginare la non esistenza di Dio». In quella filosofia, agli occhi di Newton, appare inintelligibile la distinzione fra mente e corpo, «a meno che non si dica che l'anima non ha estensione, non è sostanzialmente presente in alcuna estensione, cioè non esiste in alcun luogo: il che equivale a negarne l'esistenza» (*Unpublished Scientific Papers*, 1962, 98).

La presa di distanza dai possibili esiti ateistici e materialistici del cartesianesimo assumerà in Newton forme diverse, ma resterà un tema dominante. Sia nella *Questione 31* dell'*Opticks* (che fu aggiunta nell'edizione del 1717) sia nello *Scholium generale* la posizione di Newton è espressa con grande chiarezza: un «cieco destino» non avrebbe mai potuto far muovere tutti i pianeti allo stesso modo in orbite concentriche e la meravigliosa uniformità del sistema solare è effetto di «un disegno intenzionale». I pianeti continuano a muoversi nelle loro orbite per le leggi della gravità, ma «la posizione primitiva e regolare di queste orbite non può essere attribuita a queste leggi: la ammirevole disposizione del Sole, dei pianeti e delle comete può essere solo opera di un Essere onnipotente e intelligente». La distinzione avanzata da Boyle fra origine delle cose e regolare corso della natura veniva ripresa in questo contesto. Se è vero che «le particelle solide

furono variamente associate nella prima creazione per il consiglio di un Agente intelligente» se è vero che esse sono «state messe in ordine da Colui che le ha create», allora «non v'è ragione di ricercare una qualche altra origine del mondo o pretendere che esso possa essere uscito fuori da un Caos, ad opera delle mere leggi di natura» (*Opticks*, 1721, 377-378). Le leggi naturali cominciano ad operare solo *dopo* che l'universo è stato creato. La scienza di Newton è una descrizione rigorosa dell'universo così come esso *è*: in quanto è compreso fra la creazione del mondo narrata da Mosè e il finale annichilimento previsto da San Giovanni. Newton e i newtoniani non accetteranno mai l'idea che il mondo possa essere stato *prodotto* da leggi meccaniche.

7. *La critica al meccanicismo come materialismo: Leibniz.*

Proprio nella filosofia di Cartesio il filosofo, matematico e storico tedesco Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716) vedeva presente «la più pericolosa affermazione che possa essere fatta». Quell'affermazione avvicina, ai suoi occhi, la filosofia cartesiana a quella di Hobbes e di Spinoza, impedisce alla fisica di «nutrire la pietà», è uno dei fondamenti dell'ateismo. Ad opera delle leggi di natura (aveva scritto Cartesio nei *Principia*) «la materia assume in successione tutte le forme di cui è capace: se consideriamo tali forme per ordine si potrà giungere a quella che è propria di questo mondo» (*Opere*, II, 143-44). Se la materia, commenta Leibniz, può assumere tutte le forme possibili, ne segue che nulla di ciò che si può immaginare di assurdo, bizzarro, contrario alla giustizia non è accaduto o non potrà un giorno accadere. Allora, come vuole Spinoza, giustizia, bontà e ordine divengono solo concetti relativi all'uomo. Se tutto è possibile, se tutto ciò che è possibile *è* nel passato, nel presente e nel futuro (come vuole anche Hobbes), allora non c'è alcuna Provvidenza. Sostenere, come fa Cartesio, che la materia passa in successione tutte le forme possibili, equivale a distruggere la saggezza e la giustizia di Dio. Il Dio di Cartesio, conclude Leibniz, «fa tutto ciò che è fattibile e passa, seguendo un ordine necessario e fatale, per tutte le combinazioni possibili: a ciò bastava la necessità della materia, il Dio di Cartesio non è altro che tale necessità» (*Phil. Schr.*, IV, 283, 341, 344, 399).

Nella prospettiva di Leibniz il cartesianesimo si configura come materialismo. Quelle affermazioni di Cartesio appaiono identiche, nella sostanza, a quelle contenute nel quinto libro del *De rerum natura* di Lucrezio (vv. 430-440): in un tempo infinito si producono tutti i possibili generi di incontri e di moti e di combinazioni di atomi e si produce quindi anche il mondo reale. Dopo aver lasciato le scuole elementari — scriverà Leibniz in una lettera

autobiografica del 1714 — mi imbattei nei filosofi moderni: «Ricordo di aver passeggiato da solo, all'età di quindici anni, in un boschetto non lontano da Lipsia discutendo fra me e me se dovessi adottare la teoria delle forme sostanziali. Alla fine la partita fu vinta dal meccanicismo e ciò mi spinse verso le matematiche. Eppure, nella ricerca delle basi ultime del meccanicismo e delle leggi del moto, tornai alla metafisica e alla dottrina delle entelechie» (*Opera*, 1840, 701). Questo ritorno alla metafisica era destinato ad avere, negli sviluppi della matematica, della fisica, della biologia una straordinaria importanza. Accanto al cartesianesimo e al newtonianesimo, il leibnizianesimo sarà una delle grandi metafisiche influenti sulla scienza per tutto il Settecento ed oltre.

Leibniz è largo di riconoscimenti al meccanicismo, ma esso è una posizione parziale che va integrata in una prospettiva più ampia: è uno strumento utile nell'indagine fisica, ma è radicalmente inadeguato e insufficiente sul piano metafisico. L'indagine sulla struttura dell'universo non è separabile dalla ricerca sulle «intenzioni» di Dio: ragionare su una costruzione vuol dire infatti anche penetrare i fini dell'architetto; per spiegare una macchina è necessario «interrogarsi sul suo scopo e mostrare come tutti i suoi pezzi servono ad esso». I filosofi moderni sono «troppo materialisti» perché si limitano a trattare delle figure e dei moti della materia. Non è vero che la fisica deve limitarsi a chiedersi *come* le cose sono escludendo la domanda sul *perché* esse sono come effettivamente sono. Le cause finali non servono solo ad ammirare la saggezza divina, ma «a conoscere le cose e ad adoperarle» (*Phil. Schr.*, IV, 339).

La critica al meccanicismo di Descartes e di Gassendi (che ha inizio intorno al 1686) ne investe i presupposti fondamentali: la riduzione della materia a estensione; la costituzione corpuscolare della materia e la sua divisibilità in atomi non ulteriormente divisibili; la passività della materia; la distinzione tra il mondo della materia e quello del pensiero.

L'estensione, che è geometrica, omogenea, uniforme non spiega il moto e non spiega la resistenza dei corpi al moto. Quella resistenza non è in alcun modo derivabile dall'estensione. Nel 1686 Leibniz pubblica un articolo, che suscitò grande scalpore, intitolato *Brevis demonstratio erroris memorabilis Cartesii*. Cartesio ha commesso un «memorabile errore» ritenendo che in natura si conservi costante la quantità di moto (il prodotto della massa per la velocità di un corpo). Ciò che si conserva effettivamente costante è invece la *vis viva* o forza viva (ciò che verrà più tardi chiamato energia cinetica) che è equivalente al prodotto della massa per il quadrato della velocità. Nella prospettiva cartesiana quantità di moto e forza venivano identificate. Fra esse «si dà invece una grossa differenza e l'una non può essere calcolata dall'altra; ... sembra quindi che la forza debba piuttosto essere misurata dalla quantità

dell'effetto che può produrre; per esempio dall'altezza alla quale è in grado di far salire un corpo pesante di una data grandezza e specie, ma non dalla velocità che riesce a imprimere al corpo». A fondamento dell'errore di Cartesio e dei cartesiani sta l'aver assunto come modello le macchine semplici: «molti matematici, vedendo che nelle cinque macchine volgari velocità e massa si compensano a vicenda, stimano generalmente la forza motrice dalla quantità di moto o dal prodotto del corpo per la sua velocità». Fra la statica e la dinamica Leibniz ha tracciato una netta linea di demarcazione (Westfall 1982, 359).

La forza viva non è per Leibniz un numero o una pura quantità matematica. In essa si manifesta una realtà metafisica le cui manifestazioni non solo non si accordano con i presupposti del meccanicismo, ma richiedono il loro rovesciamento. Materia e movimento, per Leibniz, sono le manifestazioni fenomeniche di una realtà metafisica. Il polo attivo di tale realtà è il *conatus* (che è termine ricavato da Hobbes) o energia o *vis viva* che appaiono fenomenicamente come moto. Il polo passivo è la *materia prima* che appare fenomenicamente come inerzia o impenetrabilità o resistenza all'urto della materia. I corpi fisici o sostanze composte sono risultati fenomenici di punti metafisici o centri di forze o sostanze semplici e individuali creati direttamente da Dio che Leibniz, con termine pitagorico e bruniano, chiama *monadi*. Ad esse non si arriva semplicemente suddividendo la materia: prive di spazialità e di figura, le monadi sono enti in sé completi e reciprocamente indipendenti («non hanno finestre»). Ogni monade è dotata di attività rappresentativa nei confronti del resto dell'universo e di appetizione o tendenza a passare da uno stato all'altro. Le monadi sono pensate in analogia con l'anima umana. La teoria dei punti metafisici o centri di forza ricostituisce l'unità fra materiale e spirituale, rimette in discussione l'eterogeneità qualitativa fra *res extensa* e *res cogitans* che sembrava saldamente acquisita da cartesiani e atomisti.

L'atomismo è insostenibile: le unità che compongono la materia non possono essere *insieme* entità estese, dure, aventi una forma ed entità non ulteriormente divisibili. La affermazione relativa all'esistenza di atomi indivisibili ed estesi non solo è logicamente inconsistente, ma presuppone (invece di spiegarli) fenomeni quali la coesione, la rigidità, l'elasticità.

Leibniz respinge il vuoto e l'azione a distanza (in questo è d'accordo con Cartesio e in radicale disaccordo con Newton). In polemica con il newtoniano Samuel Clarke rifiuterà lo spazio assoluto (la polemica ha luogo nel 1715-16): tempo e spazio non sono né sostanze né esseri assoluti, sono soltanto l'ordine delle coesistenze e l'ordine delle successioni, sono «cose relative». In una lettera scritta al gesuita Honoré Fabri (1607 ca.-1688), Leibniz chiarisce la sua collocazione di fronte alle differenti scuole e

tradizioni: «I cartesiani collocano l'essenza del corpo nella sola estensione. Io, anche se non ammetto il vuoto (d'accordo con Aristotele e Cartesio e in disaccordo con Democrito e Gassendi), ritengo tuttavia che ci sia qualcosa di passivo nei corpi, vale a dire che i corpi resistano alla penetrazione. In ciò sono d'accordo con Democrito e Aristotele e in disaccordo con Gassendi e Cartesio» (*Math. Schr.* VI, 98-100).

Nella prospettiva di Leibniz la fisica non può essere ridotta alla meccanica e la meccanica non coincide con la cinematica (come avviene in Descartes e in Huygens). Il modello della fisica non è la situazione di una bilancia in equilibrio dove le forze appaiono uguali. La forza è uguale alla quantità di moto solo nelle situazioni statiche (Westfall 1984, 168). Per una meccanica che ha al suo centro il concetto di forza, Leibniz conia il nome di *dinamica* e impiega questo termine nell'*Essay de dynamique* (1692) e nello *Specimen dynamicum* (1695): «L'idea di virtù o energia, chiamata dai tedeschi *Kraft* e dai francesi *force*, la cui spiegazione ho attribuito alla scienza della dinamica, aggiunge molto alla nostra comprensione dell'essenza della sostanza» (*Phil. Schr.* IV, 469).

I termini *sostanza* e *attività* sono sovrapponibili: la sostanza è attività e là dove c'è attività c'è sostanza. Non tutto ciò che è, è vivente, ma dovunque è presente la vita. Nella biologia del suo tempo Leibniz trova, insieme, stimoli e conferme per il suo sistema. Alle scoperte effettuate attraverso il microscopio appare ad esempio legata la sua immagine della materia come infinito aggregato di monadi, ove ogni frammento di materia è simile a uno stagno pieno di pesci ciascuna parte del quale è, a sua volta, ancora simile ad uno stagno. Nei *Nouveaux essais sur l'entendement humaine* (1703) che contengono la celebre polemica contro l'empirismo di John Locke e la difesa dell'innatismo virtuale, Leibniz auspica un uso sempre più intenso del microscopio in vista della determinazione di sempre più ampie analogie fra gli esseri viventi. La generazione concepita come sviluppo e accrescimento (ma l'intero universo è, nella prospettiva di Leibniz, lo svolgimento di implicite possibilità già contenute nel suo inizio e già «programmate» come in un embrione) colloca Leibniz nell'ambito del cosiddetto preformismo.

L'armonia presente nel mondo reale, che è scelto da Dio come «il migliore» fra tutti i mondi possibili (*mondi* sono l'insieme di tutte le eventualità che possono coesistere senza contraddizione), esclude dalla natura i salti, le discontinuità, le contrapposizioni. La natura obbedisce ai principi della continuità e della pienezza: tutte le sostanze create formano una serie in cui è presente ogni possibile variazione quantitativa. Non c'è spazio nell'universo per due enti esattamente simili nei quali non sia possibile trovare una differenza interna (principio degli indiscernibili). Dio non pone, come in Cartesio, le verità eterne. La sua azione non è arbitraria ed Egli

obbedisce al principio di non contraddizione e ad una logica increata.

Nulla esiste o accade senza che vi sia una ragione per cui esista o accada proprio così invece che altrimenti. Le verità di fatto sono rette dal *principio di ragion sufficiente* per il quale nulla accade per caso o senza causa nell'universo. Le verità di ragione sono rette dal principio di contraddizione e in ogni enunciato vero il predicato deve inerire al soggetto. La verità non è fondata sulla intuizione di evidenze, come in Cartesio, ma dipende dalla forma del discorso. Le *essenze* o gli enti possibili sono governati dalla necessità logica, le *esistenze* o gli enti reali che costituiscono il mondo rinviano alla scelta di Dio e al principio della scelta del meglio che governa tale scelta.

Verità di ragione e verità di fatto coincidono dal punto di vista di Dio. Dal punto di vista dell'uomo, in vista di una comprensione del mondo reale, le deduzioni e le spiegazioni razionali tipiche delle scienze formali debbono convivere e intrecciarsi con la ricerca del perché un determinato fenomeno si svolge di fatto in un determinato modo. L'indagine sul mondo naturale non consta solo di deduzioni, non è solo matematica, ma è anche sperimentalismo. Il rapporto fra i singoli fenomeni è di tipo meccanico, ma quel rapporto è fondato su un ordine teleologico. Materialismo e spinozismo si configurano agli occhi di Leibniz come i figli illegittimi della nuova scienza della natura.

BIBLIOGRAFIA

Testi

F. Bacon, *Scritti filosofici*, a cura di P. Rossi, Torino, UTET, 1975.
R. Descartes, *Oeuvres*, a cura di C. Adam e P. Tannery, Paris, Cerf, 1897-1913, 12 voll. e suppl.
Id., *Opere scientifiche*, vol. I a cura di G. Micheli, Torino, UTET, 1966; vol. II a cura di E. Lojacono, Torino, UTET, 1983.
Id., *Opere*, Introduzione di E. Garin, Bari, Laterza, 1967, 2 voll.
Th. Hobbes, *Opera philosophica*, a cura di W. Molesworth, London, 1839-1845, 5 voll.
Id., *Elementi di filosofia: il corpo, l'uomo*, a cura di A. Negri, Torino, UTET, 1972.
Id., *Opere politiche*, a cura di N. Bobbio, Torino, UTET, 1959.
Id., *Il Leviatano*, a cura di R. Giammanco, Torino, UTET, 1955.
Ch. Huygens, *Oeuvres complètes*, The Hague, Martinus Nijhoff, 1888-1950, 22 voll.
Id., *L'orologio a pendolo Trattato sulla luce*, a cura di C. Pighetti, Firenze, Barbera, 1963.

G.W. Leibniz, *Opera philosophica*, a cura di I. Erdmann, Berlin, 1840, 2 voll.
Id., *Mathematische Schriften*, a cura di C.I. Gerhardt, Berlin-Halle, 1849-1863, 7 voll.
Id., *Die philosophischen Schriften*, a cura di C.I. Gerhardt, Berlin, 1875-1890, 7 voll.
M. Malpighi, *De pulmonibus seguito dalla Risposta apologetica*, a cura di S. Baglioni, Roma, 1944.
M. Mersenne, *Harmonie Universelle*, Paris, 1636.
I. Newton, *Unpublished scientific papers. A selection from the Portsmouth Collection*, a cura di A.R. Hall e M. Boas Hall, Cambridge, 1962.
G.B. Vico, *Tutte le opere*, Milano, Mondadori, 1957.

Studi

AA.VV., *Huygens et la France*, Paris, 1981.
Y. Belaval, *Leibniz critique de Descartes*, Paris, Gallimard, 1960.
P. Casini, *Natura*, Milano, Isedi, 1975.
Id., *L'universo macchina*, Bari, Laterza, 1969.
A. D'Elia, *Christiaan Huygens una biografia intellettuale*, Milano, Angeli, 1985.
E.J. Dijksterhuis, *Il meccanicismo e l'immagine del mondo da Talete a Newton*, Milano, Feltrinelli, 1971.
R. Dugas, *Histoire de la mécanique*, Neuchâtel, Griffon, 1950.
Id., *La mécanique au XVII siècle*, Paris, Dunod, 1954.
S. Grankroger (a cura di), *Descartes philosophy, mathematics, and physics*. Hassocks, Harvester Press, 1980.
E. Grant, *Much ado about nothing theories of space and vacuum from the Middle Age to the Scientific Revolution*, Cambridge, Cambridge University Press, 1981.
T. Gregory, *Studi sull'atomismo del Seicento*, in «Giornale critico della filosofia italiana», 1962, 1966, 1967.
A.R. Hall, *Da Galileo a Newton*, Milano, Feltrinelli, 1973.
G.L. Heilbron, *Alle origini della fisica moderna il caso dell'elettricità*, Bologna, Il Mulino, 1984.
M.C. Jacob, *The Newtonians and the English revolution*, Hassocks, The Harvester Press, 1976.
R.H. Kargon, *L'atomismo in Inghilterra da Harriot a Newton*. Bologna, Il Mulino, 1983.
A. Koyré, *Studi newtoniani*, Torino, Einaudi, 1972.
Id., *Etudes galiléennes*, Paris, Hermann, 1966.
R. Lenoble, *Storia dell'idea di natura*, Napoli, Guida, 1974.
Id., *Mersenne ou la naissance du mécanisme*, Paris, Vrin, 1934.
E. Mach, *La meccanica nel suo sviluppo storico-critico*, Torino, Boringhieri, 1968.
G. Micheli, *Caratteri e prospettive del meccanicismo del Seicento*, in L. Geymonat, *Storia del pensiero filosofico e scientifico*, Milano, Garzanti, 1970, vol. V, pp. 419-426.
P. Mouy, *Le développement de la physique cartesienne*, Paris, 1934.
A. Nardi, *Descartes e Galilei*, in «Giornale critico della filosofia italiana», LX, 1, 1981, pp. 129-148.
A. Pacchi, *Cartesio in Inghilterra*, Bari, Laterza, 1973.
A.I. Sabra, *Theories of light from Descartes to Newton*, London, 1967.
R.E. Schofield, *Mechanism and materialism British natural philosophy in an age of reason*, Princeton, 1970.
D.J. Struik, *The land of Stevin and Huygens*, Dordrecht, Reidel, 1981.
R. Westfall, *La rivoluzione scientifica del XVII secolo*, Bologna, Il Mulino, 1984.
Id., *Newton e la dinamica del XVII secolo*, Bologna, Il Mulino, 1982

IX. *Curve e equazioni* (di UMBERTO BOTTAZZINI)

1. *Un senatore di Tolosa: Pierre Fermat.*

Nell'ottobre del 1635 Bonaventura Cavalieri incontrava a Bologna un gentiluomo francese «molto intelligente delle matematiche», Jean de Beaugrand (?-1640?), «Consigliero e Secretario del Re di Francia», amico e corrispondente di un «tal senatore di Tolosa» che godeva fama di gran matematico. Informandone immediatamente Galilei e annunciandogli la futura visita del francese, Cavalieri scriveva di aver avuto «molto caro l'occasione tale per avere la comunicazione con quei S^{n} matematici della Francia, stante la penuria che vi è qua in Italia».

Delle contemporanee ricerche dei «franzesi», che Cavalieri reputa cose assai difficili («cure disperate») egli aveva ancora notizia da un frate di passaggio da Bologna nel 1640, il padre Jean Niceron (1613-1646), già noto per un suo lavoro di prospettiva, e, infine, da Marin Mersenne (1588-1648), il frate dell'Ordine dei Minimi il cui sterminato carteggio fu uno dei grandi tramiti della cultura matematica e scientifica del Seicento. Alla «penuria» lamentata da Cavalieri per l'Italia faceva infatti riscontro, soprattutto in Francia, una straordinaria fioritura di ricerche che andavano ben oltre i confini segnati dagli Antichi.

Tra i protagonisti di questa nuova stagione c'era Pierre Fermat (1601-1665), appunto quel «tal senatore di Tolosa» della cui amicizia si poteva vantare il signor de Beaugrand. Magistrato, «conseiller aux requêtes» presso il parlamento tolosano, Fermat fu uno straordinario e geniale dilettante di

matematiche che preferì affidare le proprie numerosissime scoperte a lettere a Mersenne o altri matematici e ad appunti e manoscritti pubblicati solo postumi. Un atteggiamento che non mancò di alimentare discussioni e polemiche, in un secolo percorso da continue dispute sulla priorità e la paternità dei risultati matematici.

Profondo conoscitore della scienza classica, agli Antichi Fermat si ispirò nei suoi studi che abbracciano i diversi campi della matematica dell'epoca, dalla geometria alla diottrica, all'algebra e alla teoria dei numeri, di cui può dirsi il moderno fondatore. Egli aveva una chiara consapevolezza dell'importanza dei propri risultati: «la posterità gli sarebbe stata grata per aver mostrato che gli antichi non hanno saputo tutto», scriveva infatti nel 1659 a Pierre de Carcavy (?-1684), il magistrato tolosano Consigliere del Regno e *protégé* di Colbert, che alla morte di Mersenne ne svolse per qualche tempo le funzioni di intermediario tra i matematici.

Lo studio dell'aritmetica di Diofanto nella recente edizione di Bachet rappresentò con ogni probabilità la fonte delle geniali scoperte di Fermat nel campo della teoria dei numeri. Nel 1621 infatti Claude Gaspard Bachet de Méziriac (1581-1638), un matematico che nel 1612 aveva già pubblicato una raccolta di *Problèmes plaisants et délectables qui se font par les nombres*, dava alle stampe una nuova edizione di Diofanto, condotta sul testo greco e comparata con quella di Xylander, che egli corredava di proprie note e commenti.

Meditando sul testo di Diofanto, Fermat annotava sul margine delle pagine le idee che la lettura gli suggeriva. Queste note, pubblicate postume (1670) dal figlio Samuel in una riedizione del libro di Bachet, comprendono alcuni dei teoremi più profondi ed eleganti della teoria dei numeri interi, una teoria «assai bella e sottile», scriveva Fermat, che «non fu nota sino ad oggi né a Bachet né ad alcun altro».

«È assolutamente impossibile dividere un cubo in due cubi, un biquadrato in due biquadrati e in generale una qualunque potenza all'infuori del quadrato in due potenze dello stesso esponente» annotava Fermat. «Di ciò ho scoperto una dimostrazione veramente meravigliosa, ma il margine è troppo stretto per contenerla». Con queste parole il tolosano annunciava «l'ultimo teorema di Fermat», il fatto cioè che $x^n + y^n = z^n$ non ha soluzioni intere per $n>2$. Egli non rese mai nota la sua dimostrazione «veramente meravigliosa», limitandosi a dare una traccia per $n=3$ in una lettera a Carcavy.

Seguendo metodi diversi tra loro, matematici come Euler, Dirichlet e Kummer (vol. II, capp. IV, VI) riusciranno a verificare l'enunciato di Fermat solo per determinati valori di n, ma una dimostrazione per n qualunque resiste ancora oggi agli sforzi dei matematici. Se si pensa agli

straordinari sviluppi conosciuti dalla moderna teoria dei numeri (vol. III, cap. XII) sembra ragionevole supporre che Fermat si ingannasse sulla correttezza della propria dimostrazione. Sull'«ultimo teorema di Fermat» si sono concentrate nel corso dei secoli anche le fatiche di schiere di dilettanti, presunti «dimostratori» catturati dalla semplicità della congettura e dalla fama assicurata al primo in grado di darne una dimostrazione. Il teorema di Fermat sembra in realtà rappresentare la clamorosa, estrema conferma di un fatto assai frequente in teoria dei numeri, dove enunciati di natura elementare comportano dimostrazioni di grande raffinatezza e difficoltà.

In margine alle pagine di Diofanto, Fermat aveva annotato altri risultati, come l'elegante teorema: «un numero primo della forma $4n+1$ è solo una volta ipotenusa di un triangolo rettangolo, il suo quadrato lo è due volte, il suo cubo tre, il suo biquadrato quattro ecc.». Così per esempio se si prende il primo numero primo della forma richiesta ($n=1$) si ha:

$5^2=3^2+4^2$; $25^2=15^2+20^2=7^2+24^2$;

$125^2=75^2+100^2=35^2+120^2=44^2+117^2$

$625^2=175^2+600^2=220^2+585^2=336^2+527^2=375^2+500^2$

A ciò Fermat aggiungeva immediatamente dopo: «Un tale numero primo e il suo quadrato si possono dividere solo una volta in due quadrati, il suo cubo e il suo biquadrato due volte, il quadratocubo e il cubocubo tre volte etc.». In altri termini, ricorrendo allo stesso esempio di prima:

$5=1+4$; $5^2=9+16$; $5^3=4+121=25+100$;

$5^4=49+576=225+400$; etc.

Commentando una proposizione di Diofanto, Bachet aveva affermato che un qualunque numero si può scomporre nella somma di al più quattro quadrati. In margine Fermat aggiungeva il teorema molto più generale e profondo (dimostrato solo nel secolo scorso) che «ogni numero o è un numero triangolare o è la somma di 2 o 3 numeri triangolari; o è un quadrato o è la somma di 2, 3 o 4 quadrati; o è un numero pentagonale o è la somma di 2, 3, 4 o 5 numeri pentagonali e così via per numeri esagonali, ettagonali e numeri poligonali qualunque». Lo stesso Fermat aggiungeva di non poterne dare al momento la dimostrazione, che dipendeva «da molti e reconditi misteri dei numeri» e annunciava invece l'intenzione di consacrare all'argomento un'opera specifica che avrebbe arricchito l'aritmetica degli Antichi «in una maniera meravigliosa». Un proposito che Fermat tuttavia non tradusse mai in realtà, limitandosi a comunicare i nuovi risultati raggiunti in lettere agli amici.

Marin Mersenne, il cui nome è rimasto legato ai numeri primi della forma 2^p-1, era un interlocutore particolarmente sensibile alle scoperte numeriche di Fermat, così come Bernhard Frénicle de Bessy (1602?-1675). A quest'ultimo Fermat scriveva il 18 ottobre 1640 che «ogni numero primo

misura infallibilmente una delle potenze -1 di qualunque progressione si voglia e l'esponente della suddetta potenza è sottomultiplo del numero primo dato -1. E dopo aver trovato la prima potenza che soddisfa alla questione, tutte quelle i cui esponenti sono multipli dell'esponente della prima soddisfano ancora alla questione» (Fermat 1679, 163). Non è difficile riconoscere dietro queste parole l'enunciato del «primo teorema di Fermat», che in simbolismo moderno si scrive $a^n \equiv 1 \pmod p$, $p \equiv 1 \pmod n$ e che fu dimostrato da Leibniz e poi da Euler con un ragionamento ricorsivo.

Nella stessa lettera Fermat considerava i numeri della forma $2^{2^n} + 1$, che anche Frénicle aveva verificato esser primi per $n = 0,1..,4$. Il tolosano condivideva l'opinione (che era stata anche di Torricelli) che tali numeri fossero primi anche per valori successivi di n, pur non essendo riuscito «a dimostrare necessariamente la verità di questa proposizione». Fermat ritornò più volte sulla questione e ancora nel 1654 confermava a Pascal la sua opinione. Solo un secolo dopo, Euler provò che Fermat si era ingannato, mostrando che $2^{2^5} + 1 = 4294967297$ è divisibile per 641 e oggi è noto che fino a $n = 16$ i numeri di Fermat sono composti.

I «misteri» dei numeri affascinavano talmente Fermat che egli pensò di farne oggetto di una sfida ai matematici: attraverso l'amico Sir Kenelm Digby (1603-1665) invitò nel 1657 i matematici inglesi e John Wallis in particolare a risolvere il seguente quesito: «Trovare un cubo che sommato ai suoi divisori dia luogo a un quadrato». Fermat dava un primo esempio di $343 = 7^3$ e $1 + 7 + 49 + 343 = 400 = 20^2$ e sfidava a trovare altri numeri della stessa natura. Analogamente richiedeva di trovare un quadrato che sommato ai suoi divisori desse luogo a un cubo. Poco più tardi aggiungeva la richiesta di determinare soluzioni intere dell'equazione $ax^2 + 1 = y^2$ (a intero non quadrato).

Alla prima sfida rispose immediatamente Frénicle con i numeri $(751530)^3$ e $(37200735)^3$; altre due soluzioni, aggiungeva Frénicle, erano date moltiplicando questi due per il numero 343 proposto da Fermat. La seconda sfida lanciata da Fermat, di cui Wallis fu informato da lord William Brouncker (1620?-1684) occasionò un intenso carteggio tra i due, Frans van Schooten (?-1661) e Fermat, che fu pubblicato nel 1658 e che rappresenta una importante fonte per lo studio dell'aritmetica superiore di quel periodo. Nelle pagine del *Commercium epistolicum*, Wallis e Brouncker mostravano tra l'altro come determinare una soluzione dell'equazione proposta da Fermat e da questa ricavarne infinite altre. Gli stessi matematici esortavano inoltre Fermat a rivelare il metodo che gli aveva consentito di trovare tanti risultati e svelare tanti «misteri» dei numeri.

Che il geniale tolosano fosse in possesso di un metodo generale di scoperta sembrava ai suoi interlocutori un fatto inoppugnabile. Lo stesso

Fermat aveva del resto apertamente ammesso la cosa scrivendo a Roberval nel 1636: «Per ciò che attiene ai numeri e alle loro parti aliquote ho trovato un metodo generale per risolvere tutte le questioni per algebra, sulla qual cosa ho progettato di scrivere un piccolo trattato». Rispondendo in parte alle richieste contenute nel *Commercium epistolicum*, Fermat redigeva l'anno seguente una *Relation des découvertes en la science des nombres* che dovette girare manoscritta tra i matematici del tempo e pervenire nelle mani di Frénicle e di Wallis.

Fermat vi affermava di essersi servito, soprattutto nelle sue dimostrazioni di impossibilità, di un metodo da lui elaborato ispirandosi con ogni probabilità ad un'osservazione di Campano ad un teorema del libro IX degli *Elementi* di Euclide, metodo che Fermat chiamava della «descente infinie ou indéfinie», della «discesa infinita o indefinita». Con tale metodo aveva per esempio dimostrato che non si danno «triangles rectangles en nombres» triangoli rettangoli in numeri la cui superficie sia un numero quadrato. Verificando la cosa con un esempio, un tale triangolo ha lati 3 e 4 e ipotenusa 5 e la superficie è 6 (che appunto non è un quadrato perfetto). La tecnica dimostrativa di Fermat era la seguente: se ci fosse un tale triangolo con la proprietà richiesta, allora *si poteva dimostrare* che ne esisteva un altro, dato da numeri più piccoli, che godeva della stessa proprietà; da questo se ne poteva ricavare un terzo, un quarto e così via, tutti in possesso della proprietà richiesta. Ma siccome non esistono infiniti numeri interi di grandezza sempre decrescente, l'assunzione di partenza doveva essere falsa: non esiste dunque un tale «triangle rectangle en nombres».

Il punto delicato nella procedura di Fermat era il passaggio dal primo al secondo triangolo, di cui Fermat semplicemente affermava di *poter dimostrare* l'esistenza, lasciando ai suoi interlocutori il compito di trovare *come*. In maniera analoga, egli affermava, si poteva dimostrare che un cubo non si può scomporre nella somma di due cubi, il primo e più semplice caso ($n = 3$) del suo «ultimo teorema».

Lo stesso metodo, continuava Fermat, poteva venir adottato anche per rispondere a «questioni affermative», come per esempio provare che ogni numero primo della forma $4n + 1$ si può scrivere come somma di 2, 3 o 4 quadrati; e ancora per tale via si potevano trovare le soluzioni intere di $ax^2 + 1 = y^2$, cosa che egli suggeriva a Frénicle e Wallis «in modo che essi adattassero la dimostrazione e costruzione generale del teorema e del problema alle singole soluzioni che ne hanno dato». Di fatto però né Frénicle né Wallis e gli altri matematici che ebbero tra le mani la *Relation* riuscirono nell'intento e il giudice tolosano si portò nella tomba il segreto del proprio metodo.

2. *Divinazioni, porismi e «luoghi piani e solidi».*

La pubblicazione della *Géostatique* (1636) da parte del signor de Beaugrand fu occasione di un fitto carteggio tra i matematici francesi sui princìpi della statica e le irrisolte questioni della gravità e dell'attrazione dei corpi. Mersenne, al solito, fu il primo destinatario e tramite di quella corrispondenza scientifica, testimone sia della devastante critica di Descartes all'opera del «géostaticien», sia delle più pacate ma non meno penetranti osservazioni di Fermat. Alla discussione parteciparono anche Roberval, come era comunemente chiamato (dal nome del villaggio di nascita) Gilles Personne (1602-1675), professore al Collège de France, e Etienne Pascal (1588-1651), padre del più celebre Blaise, buon matematico egli stesso che fu, durante il suo soggiorno a Parigi (1631-1638) in stretto contatto con il circolo di Mersenne.

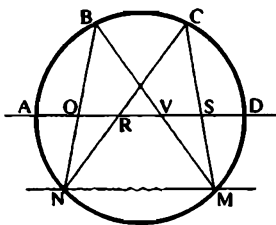
Nelle sue lettere Fermat mostrava grande familiarità con le opere dei classici, da Archimede a Pappo e Apollonio, e scrivendo a Roberval e Pascal di aver determinato il rapporto tra il conoide parabolico archimedeo e il cono della stessa base iscritto in esso così come, «non senza difficoltà» (*nec res vacabat difficultate*) il rapporto tra il solido generato dalla semiparabola ruotante intorno alla base e il cono in essa iscritto, aggiungeva: «Ho trovato molte altre proposizioni geometriche, come la restituzione di tutte le proposizioni dei luoghi piani e altre, ma ciò che io stimo più di tutto il resto è un metodo per determinare ogni sorta di problema piano o solido, mediante il quale trovo l'invenzione del massimo e minimo in ogni problema qualsivoglia» (in Fermat 1679, 132).

In maniera un po' criptica, come d'abitudine, Fermat comunicava così agli amici parigini i risultati dei suoi profondi e solitari studi sui classici, intrapresi da qualche anno e che si affiancavano alle sue geniali scoperte numeriche. Come Fermat scriveva nello stesso anno a Mersenne, si trattava in primo luogo della «divinazione» dei primi due libri di Apollonio sui luoghi geometrici piani, menzionati da Pappo all'inizio del settimo libro delle sue *Collezioni matematiche*. Lavorando sull'edizione di Commandino e cercando di divinare ciò che Pappo aveva detto con «verbis tamen aut obscuris, aut sane interpreti minus perspectis», Fermat era riuscito in un'opera che si affiancava — anzi per molti versi «audaciter» si opponeva — ai precedenti e analoghi tentativi di Viète e a quelli da lui influenzati di Getaldić e W. Snellius (l'*Apollonius Gallus*, *Illyricus* e *Batavus* rispettivamente, come essi erano chiamati all'epoca).

I teoremi così ottenuti da Fermat sui luoghi piani (retta e circonferenza), comunicati a Roberval e da questi presentati «à l'Assemblée de nos Mathématiciens» a Parigi nel 1637, furono accolti «avec étonnements des

esprits», come testimoniava ammirato lo stesso Roberval in una lettera al magistrato tolosano.

Ancora nel libro VII delle *Collezioni* Pappo aveva fatto menzione, tra i libri degli antichi geometri, dei *Porismi* di Euclide andati perduti. In un breve scritto di quattro pagine Fermat proponeva ai geometri contemporanei una *Porismatum euclideorum renovata doctrina*, saggio della sua divinazione dell'intera opera euclidea, che doveva constare di tre libri. Che cosa sono i porismi? Anche l'interpretazione del termine era alquanto dubbia; sulla scorta delle poche e oscure allusioni di Pappo, Fermat suggeriva la seguente: «Quando studiamo un luogo, ricerchiamo una linea retta o curva che ci è ignota finché non designiamo il luogo stesso della linea da trovare, ma quando da un luogo supposto dato e conosciuto andiamo alla ricerca di un altro luogo, questo nuovo luogo è chiamato porisma da Euclide» (Fermat 1679, 118).

Come esempio di questa «analisi di problemi oscuri» Fermat proponeva cinque porismi, tra i quali figurava il notevolissimo enunciato (*Porisma 3*):

Data una qualunque circonferenza di diametro AD e condotta una parallela NM al diametro che tagli la circonferenza nei punti M e N, si consideri un punto qualunque B della circonferenza. Le rette NB e MB tagliano il diametro in due punti O e V tali che il rapporto tra i rettangoli AO.DV e AV.DO è costante al variare di B. Se si considera un altro punto C e le corde CN e CM, le loro intersezioni R e S con AD sono ancora tali per cui il rapporto tra i rettangoli AR.DS e AS.DR è dato dal rapporto tra AO.DV e AV.DO. «Né è difficile estendere tale proposizione alle ellissi e alle iperboli», aggiungeva Fermat.

Il *Porisma 3* di Fermat non era dunque altro che il celebre teorema di Desargues (v. oltre) sull'involuzione di sei punti (i punti ADOVRS), fondamentale nella moderna geometria proiettiva. Alla fine del saggio, Fermat affermava di aver esteso la dottrina dei porismi euclidei anche alle sezioni coniche e ad altre curve, scoprendo cose mirabili e «hactenus ignota», di cui tuttavia non è rimasta traccia.

Anche dopo Fermat la soluzione dell'enigma dei porismi euclidei ha continuato ad affascinare i geometri: nel Settecento lo scozzese Robert Simson (1687-1768) si affaticò a lungo su queste ricerche, completando e dimostrando le trentotto proposizioni sui porismi enunciate da Pappo e i cinque porismi di Fermat. Ancora nell'Ottocento il francese Michel Chasles (1793-1880) pubblicava una propria «divinazione» dell'opera euclidea ne *Les trois livres de Porismes d'Euclide* (1860), dove sosteneva l'ardita tesi che «i porismi, nel pensiero di Euclide erano in qualche modo le *equazioni* delle curve». A suo parere quindi dietro il mistero della dottrina dei porismi si celava semplicemente «la Geometria analitica degli Antichi»: la teoria cioè della trasformazione dell'espressione di un luogo geometrico dato in una altra più semplice per studiare le proprietà del luogo.

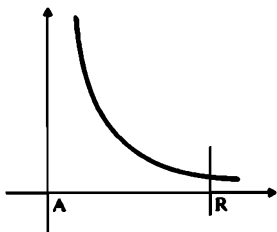
Per quanto profondi e originali, i risultati di Fermat sui luoghi di Apollonio e sui porismi si collocavano tuttavia in una linea di ricerca — la «restituzione» delle opere degli Antichi — che i geometri avevano perseguito lungamente nel Cinquecento dopo la scoperta dei primi testi classici.

Ancora all'*Apollonius Gallus*, a Viète e alla sua opera di «divinazione», si ispirava Fermat nel *De contactibus sphaericis*. Viète aveva affrontato il problema (apparentemente trattato da Apollonio in un'opera andata perduta), di costruire un cerchio tangente ad altri tre, e Descartes aveva suggerito a Mersenne (nel 1630) di estendere il problema al caso di una sfera tangente ad altre tre. Fermat risolveva ora la questione più generale, considerando la sfera passante per m punti e toccante p piani e s sfere, con la condizione $m+p+s=4$. L'ultimo caso, di trovare una sfera tangente a 4 sfere, veniva solo tratteggiato da Fermat sulla base dei risultati già ottenuti, per non appesantire «in immensum» il suo trattato. Conosciuto il lavoro di Fermat, Descartes lo esortò, attraverso Mersenne, a trovare una soluzione algebrica in luogo di quella puramente geometrica, senza tuttavia riuscire a convincere il tolosano.

Pur padroneggiando magistralmente l'arte analitica di Viète, Fermat non attribuiva infatti particolare valore alla risoluzione algebrica dei problemi geometrici, quando si poteva trovare una via geometrica che portava in maniera naturale allo scopo. In questo modo egli aveva determinato la quadratura delle parabole generali $y^{m/n} = px$ (m e n interi positivi), e ne aveva dato notizia a Cavalieri, avvertendolo inoltre degli studi di Roberval sullo stesso argomento. Ancora per via geometrica, aveva dimostrato la rettificabilità della parabola semicubica $y^3 = px^2$, risultato poi pubblicato nella anonima *De linearum curvarum cum lineis rectis comparatione*, posta come appendice al volume *Veterum geometria promota* (1660) del gesuita tolosano Antoine de la Louvère (1600-1664).

Attraverso Carcavy e Mersenne, Fermat doveva aver avuto notizia dei

contemporanei successi di Torricelli nella quadratura della spirale logaritmica. Al matematico italiano egli comunicava i propri risultati sulle infinite iperboli $x^m y^n = k$. Di queste curve anche Torricelli aveva trovato la quadratura con la tecnica degli indivisibili curvi, come si legge negli appunti redatti «alla spezzata» per la memoria *De infinitis hyperbolis*.

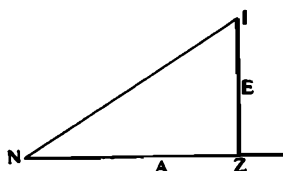
Per quadrare il segmento di iperbole $x^m y^n = k$ (o di parabola $y = px^n$)

Fermat si serviva, nel *De aequationum localium transmutatione et emendatione*, di una brillante generalizzazione di una tecnica archimedea: anziché suddividere l'intervallo AR secondo una progressione aritmetica, come aveva insegnato il grande Siracusano, Fermat considerava una progressione geometrica di ragione <1, di cui mostrava la convergenza in un teorema fondamentale dal quale «tota haec methodus innititur». In questo modo calcolava la quadratura considerando l'area del «plurirettangolo» iscritto e, come si dice oggi, il suo limite al tendere a zero dell'ampiezza degli intervalli di suddivisione.

Quadrature e rettificazioni erano certo problemi di grande momento, ma il risultato più importante al quale era pervenuto Fermat, «ciò che stimo più di tutto il resto» come aveva scritto agli amici parigini, era il metodo «per determinare ogni sorta di problema piano o solido» ivi compresi quelli della ricerca dei massimi e minimi e delle tangenti. Né egli si ingannava nel valutare l'importanza di queste sue scoperte, che ne fanno con Descartes il fondatore della geometria analitica e un consapevole precursore dei metodi del calcolo infinitesimale.

Fermat aveva esposto le sue idee in due brevi scritti, rimasti inediti fino al 1679: *Ad locos planos et solidos isagoge* e *Methodus ad disquirendam maximam & minimam*, entrambi redatti con ogni probabilità verso il 1636.

L'idea fondamentale dell'*Isagoge* è immediatamente presentata da Fermat in apertura del suo lavoro: «Quoties in ultima aequalitate duae quantitates ignotae reperiuntur, fit locus loco, & terminus alterius ex illis describit lineam rectam, aut curvam, linea recta unica & simplex est, curva infinita,

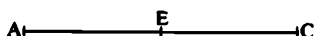
circulus, parabole, hyperbole, ellipsis &c.» (Fermat 1679, 1). Quando in un'equazione finale compaiono due incognite si ha un luogo geometrico e l'estremità di una di esse (pensata come un segmento) descrive una retta o una curva, un cerchio o una conica qualunque, queste ultime essendo nella terminologia classicheggiante di Fermat i «luoghi solidi».

Consideriamo con Fermat una retta data NZ e un punto fisso N. Supposta scelta un'unità di misura dei segmenti (il che Fermat assume

tacitamente) sia NZ il segmento misurato dalla prima incognita A. Da Z si innalzi secondo un angolo dato (che Fermat generalmente prende retto) un segmento ZI di lunghezza pari all'altra incognita E. È chiaro che al variare di A (e dunque del punto Z), varierà anche E secondo l'equazione data e il punto I descriverà una curva, come appunto afferma Fermat. Se alle incognite A e E, che Fermat eredita da Viète, si sostituiscono le lettere x e y oggi usuali, l'asserto di Fermat si traduce nel linguaggio familiare della geometria delle coordinate.

Con una semplice similitudine fra triangoli il matematico tolosano mostrava poi che ogni equazione di primo grado in due incognite è rappresentata da una retta. Anche le equazioni dei luoghi «solidi» erano ottenute sulla base delle loro proprietà geometriche, con considerazioni appesantite peraltro dalla richiesta della omogeneità dei termini delle equazioni. Una richiesta coerente col simbolismo dell'arte analitica di Viète, di cui ci si libererà solo con Descartes. Un saggio della potenza del metodo nel risolvere problemi relativi a luoghi piani o «solidi» era dato secondo Fermat da questa «pulcherrima propositio»: Dato un numero qualunque di rette e condotta ad ognuna di esse una retta da uno stesso punto e secondo angoli dati, se la somma dei rettangoli ottenuti da ogni coppia di rette (o rispettivamente dei quadrati delle rette tracciate) è uguale a una data area, il luogo del punto è una retta (o risp. una conica).

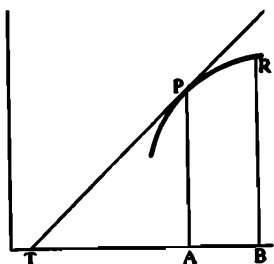
Frutto di un'originale elaborazione dei classici era anche l'idea che portava Fermat al metodo per la determinazione dei massimi e minimi. Si scriva, dice Fermat, l'equazione nell'incognita A cui porta il problema di massimo o minimo che si vuole risolvere; si ponga poi A + E in luogo di A e si

«adeguaglino» («adaequentur, ut loquitur Diophantus») le due espressioni, si semplifichino i termini uguali e poi si divida per E. Infine si ponga E uguale a zero in entrambi i membri («ex parte utravis affectione sub E, omnino liberetur»): il valore di A così ottenuto dà il massimo o minimo cercato.

Fermat illustrava la propria regola con un esempio elementare: dividere un segmento dato in due parti tali che il rettangolo da esse formato abbia area massima.

Sia B la lunghezza di AC e sia A una parte di AC e B−A la rimanente e A(B−A) il rettangolo di cui si deve massimizzare l'area. Se si incrementa A di E, si otterrà $(A+E)(B-A-E)$. Se si «adeguagliano» (*adaequantur*) le due espressioni ottenute: $A(B-A)=(A+E)(B-A-E)$ e si elidono i termini simili si ha $0=BE-2AE-E^2$; dividendo poi per E e ponendo $E=0$ si ricava $A=B/2$ e il problema è risolto considerando il quadrato di lato metà del segmento. «Nec potest generalior dari methodus», né si può dare un metodo più generale, conclude Fermat.

La tecnica di Fermat anticipa in modo impressionante quelle proprie del calcolo infinitesimale, che saranno messe a punto qualche decennio dopo da Leibniz e Newton. Già con Fermat si affaccia una delle questioni più delicate e controverse di tutto il calcolo: com'è possibile che E sia prima diverso da zero e poi sia posto uguale a zero?

Fermat tace su questo punto, né i contemporanei sembrarono rilevare l'implicita contraddizione logica presente nel metodo; ciò su cui insiste è invece la grande potenza del metodo, che egli applica con successo alla determinazione della tangente in un punto a curve della più varia natura, dalle coniche alla cissoide di Diocle, alla concoide di Nicomede, alla cicloide e alla quadratrice di Dinostrato. Lo stesso metodo, aggiunge Fermat, consente di trovare sia i punti di flesso di una curva «in quibus curvatura ex convexa fit concava», sia il centro di gravità dei solidi, cosa che egli illustra col classico esempio del conoide parabolico.

L'idea cui sistematicamente ricorre Fermat e che sta alla base del metodo è quella, ispiratagli più dallo studio di Pappo che dalla *Stereometria* di Kepler, che in presenza di punti estremanti (massimi, minimi o flessi) un determinato rapporto — che oggi si chiama *rapporto incrementale* — è *stazionario*. È questa l'idea che consente anche di risolvere il problema della tangente ad una curva PR in un punto P, utilizzando la «proprietà specifica» (ossia l'equazione) della curva.

Per Fermat, così come per i fondatori del calcolo infinitesimale, il problema è risolto allorché si è determinata la *sottotangente* alla curva nel punto P, cioè il segmento AT.

Come scriveva a Roberval nel settembre del 1636, Fermat era pervenuto già sette anni prima al suo metodo, e ne aveva dato notizia a un certo signor Despagnet di Bordeaux. Venuto poi a conoscenza della *Géométrie*, dove Descartes affrontava il problema delle tangenti in maniera completamente diversa, Fermat inviava nel 1638 una redazione del suo metodo — con ogni probabilità lo stesso scritto sopra discusso — al padre Mersenne perchè lo facesse giungere all'autore della *Géométrie*.

L'animata discussione che si aprì tra i matematici intorno al problema delle tangenti (e ai metodi proposti per risolverlo) fu tuttavia solo uno degli aspetti del più generale dibattito che fece seguito alla pubblicazione del *Discours de la méthode* e dei tre *Essays* che Descartes scrisse per illustrarlo.

3. *«Ragioni evidenti e matematiche»: René Descartes.*

Nel 1618 il *physicus-mathematicus* olandese Isaac Beeckman (1588-1637) aveva conosciuto per caso a Breda all'Accademia militare un giovane francese volontario nell'esercito di Maurizio di Nassau. Da diversi anni Beeckman stava meditando intorno al difficile problema della caduta dei gravi: critico della fisica aristotelica così come della dottrina dell'*impetus* e sostenitore, con Bruno, dell'infinità dell'universo e dell'esistenza del vuoto, fin dal 1613 era in possesso della legge della conservazione del movimento e aveva risolto il problema del moto dei proietti. Riconosciute le grandi doti del giovane amico straniero, si rivolse a lui chiedendogli se «è possibile conoscere qual è lo spazio che un corpo che cade percorre in un'ora, quando si sa quanto ne percorre in due ore».

«Ho risolto la questione» annotava nelle sue *Cogitationes privatae* il ventitreenne René Descartes (1596-1650), il francese al quale Beeckman aveva posto il quesito. In realtà Descartes aveva dato a quel «vir ingegnosissi-

mus» con cui gli era «capitato, pochi giorni fa, di stringere amicizia» due risposte: la prima seguendo il principio di Beeckman che «ciò che si muove nel vuoto, si muove, *secondo lui*, per l'eternità»; la seconda ammettendo l'ipotesi che la forza d'attrazione cresca col tempo. «Come sarebbe possibile un tale aumento della "forza d'attrazione"?» si è chiesto Koyré. Descartes significativamente non si pone neppure il problema: egli considera infatti il quesito che gli è stato posto «non da fisico, ma da puro matematico» (Koyré [1966], 1976, 113). Dopo questo primo contatto i frequenti incontri e la consuetudine col *physicus-mathematicus* olandese offrono al giovane Descartes una quantità di nuovi problemi e argomenti su cui riflettere, dopo aver lasciato le discussioni con i «curiosi» parigini, i gentiluomini attenti alle più varie e straordinarie novità scientifiche, che con le loro conversazioni animavano i salotti colti della città.

Durante il suo soggiorno a Parigi, Descartes era entrato in contatto con gli esponenti di quella cultura disorganica e eterogenea che andava affermandosi in opposizione alla filosofia neoscolastica e al principio d'autorità nella scienza, uomini che rifiutavano i pregiudizi e le superstizioni ed erano affascinati dalle continue scoperte nei campi più diversi del sapere, dall'anatomia alla diottrica alla matematica all'astronomia.

L'emergere di una esigenza unitaria nel trattare i fenomeni scientifici porta Descartes ad un lento affrancamento dalla cultura dei «curiosi». Dopo l'incontro con Beeckman, matura un vasto e ardito progetto di una «scienza affatto nuova». Scrive infatti Descartes all'amico nel marzo del 1619: «Non vorrei pubblicare un'*Ars brevis* come Lullo, ma una scienza affatto nuova, tale da poter risolvere in generale tutti i problemi che ci possono venir proposti in rapporto a qualsiasi genere di quantità, sia continua sia discontinua». Sul punto di lasciare Breda per un viaggio in Europa, aggiunge: «Se, come spero, mi fermerò in qualche luogo, ti prometto di mettermi subito ad elaborare la mia *Meccanica* o *Geometria*, e saluterò in te il promotore e l'artefice dei miei studi» (in Descartes 1983, 82-83).

Il progetto allora accarezzato da Descartes doveva trovare realizzazione solo molto più tardi, nel 1637.

I lunghi viaggi prima attraverso la Danimarca e la Germania e poi in Austria e in Boemia al seguito delle armate del duca di Baviera e ancora, lasciate le armi, in Italia e infine dal 1628 in Olanda e la fitta corrispondenza scambiata con alcuni degli scienziati più in vista dell'epoca, ci offrono l'immagine di un uomo che ha conosciuto gli ambienti colti e mondani europei, interlocutore attento e curioso, che a Ulm discute con J. Faulhaber (1580-1635) dei più recenti progressi dell'algebra e a Leida con Jacobus Golius (1596-1667), il rettore dell'università, del problema di Pappo; conosce le opere di Stevin e, con ogni probabilità, di Viète («Ho iniziato

dove Viète ha finito», scrive a Mersenne nel 1637), è al corrente dei lavori di Galileo e di Fermat, studia Kepler dei cui risultati si serve nelle sue ricerche di diottrica, discute con Mersenne, Beeckman e Costantin Huygens (1596-1687) poeta, statista e cultore di scienze (padre del più celebre Christiaan) della legge di rifrazione e della natura della luce.

In quegli anni Descartes perviene così ad alcuni dei risultati più significativi poi presentati nella *Géométrie*: la costruzione geometrica delle soluzioni di problemi di 3° e 4° grado, la distinzione tra curve algebriche e meccaniche, la soluzione del problema di Pappo, propostogli da Golius. Elabora inoltre il primo abbozzo del *De solidorum elementis*, uno scritto sui poliedri in cui Descartes mostra che se con V si indicano i vertici, S gli spigoli e F le facce di un poliedro, allora vale la relazione $V+F=S+2$, usualmente nota col nome di Euler.

Le ricerche cartesiane di matematica si intrecciano con quelle di filosofia, di ottica, di cosmologia. Scrive infatti in quegli anni le *Regulae ad directionem ingenii* e il *Monde*, un'esposizione organica delle sue concezioni fisiche e cosmologiche, che la notizia della condanna di Galileo gli suggerisce di non pubblicare.

Le *Regulae*, in particolare, rappresentano un momento oltremodo significativo dell'elaborazione concettuale della matematica cartesiana, della ricerca di un linguaggio adeguato e di una struttura metodica con cui articolare le sue scoperte matematiche: «Quella scienza che con nome straniero chiamano Algebra non ci sembra essere diversa dalla Matematica, sempre che si riesca a liberarla dai troppi numeri e dalle inesplicabili figure sotto i quali è sepolta», si legge infatti nella IV *Regula*. È questo il risultato cui approderà con la *Géométrie*.

Nel 1635 Descartes aveva approntato per la stampa la *Dioptrique* e qualche tempo dopo le *Météores*, saggi per i quali aveva redatto, come prefazione, il celebre *Discours de la méthode pour bien conduire sa raison et chercher la vérité dans les sciences*, che uscì anonimo a Leida nel 1637 insieme alla *Dioptrique*, le *Météores* e la *Géométrie* (redatta nel frattempo) «che sono saggi di questo metodo», come si legge nel titolo dell'opera. Il complesso itinerario teorico del quale Descartes dava conto nel *Discours de la méthode* si era continuamente intrecciato con riflessioni sulla natura della matematica: dalle dimostrazioni dei matematici egli aveva infatti preso le mosse per «abituare il mio ingegno a nutrirsi di verità» e nella *Géométrie*, come saggio paradigmatico, trovarono concreta realizzazione le regole metodologiche che aveva elaborato e si era imposto «pour bien conduire sa raison». Un metodo «che consiste più in pratica che in teoria», scriveva ancora a Mersenne ed era illustrato dagli *Essays*, con cui Descartes si presentava per la prima volta al pubblico colto, perchè «da essi si può conoscere cosa vale».

Per la maggioranza dei matematici la *Géométrie* si annunciava fin dalle prime righe inattesa e sorprendente: «Tutti i Problemi di Geometria possono facilmente esser riportati a termini tali che poi, per costruirli, non c'è da conoscere che la lunghezza di alcune linee rette»: questa è la dichiarazione programmatica che si legge in apertura del I libro dedicato ai «Problemi che si possono costruire usando solo cerchi e linee rette».

Descartes comincia col mostrare come si può rapportare il calcolo aritmetico alle operazioni geometriche, introducendo esplicitamente un'unità di misura dei segmenti ed esibendo le semplici costruzioni sui segmenti che corrispondono alle usuali operazioni aritmetiche o all'estrazione di radice quadrata, cubica ecc., ciò che equivale a «trovare una, due o più medie proporzionali fra l'unità e qualche altra linea».

«A questo proposito — osserva Descartes — debbo notare che con a^2 o b^2 o espressioni simili intendo in genere soltanto linee assolutamente semplici, anche se le chiamo, per servirmi dei termini dell'algebra, quadrati, cubi, ecc.» (Descartes [1637], 1983, 532): è questo un passo cruciale nella costruzione cartesiana, davanti al quale si erano arrestati esitanti sia gli algebristi del Cinquecento sia Viète. Liberandosi della legge di omogeneità di Viète, che imponeva di confrontare grandezze della stessa dimensione, e affrancandosi dalla rigida interpretazione geometrica delle potenze che gettava i matematici nel più grave imbarazzo non appena si consideravano esponenti maggiori o uguali a quattro, Descartes apriva magistralmente la via a quella profonda riforma concettuale del rapporto fra algebra e geometria, alla quale aveva pensato fin dall'epoca dei suoi primi incontri con Beeckman.

La risoluzione di un problema geometrico si traduce così, in maniera naturale, nella costruzione di un'equazione: «Volendo risolvere qualche problema — scrive infatti Descartes ([1637], 1983, 534-536) — si deve fin da principio considerarlo come già risolto, e assegnare una lettera ad ogni linea che si ritiene necessaria per costruirlo, sia a quelle che non sono note, sia alle altre. Poi, senza far nessuna differenza tra quelle note e le incognite, bisogna svolgere il problema seguendo quell'ordine che più naturalmente di ogni altro mostra in qual modo le rette dipendono mutuamente le une dalle altre, fino a che non si sia riusciti a trovare il procedimento per esprimere una stessa quantità in due modi, fino cioè a che non si sia pervenuti a ciò che si chiama Equazione».

L'analisi degli Antichi, già richiamata in vita dall'*Isagoge* di Viète e ora «liberata dalle inesplicabili figure» sotto le quali era sepolta, diventa nelle mani di Descartes la chiave di volta delle costruzioni matematiche: l'indagine metodica consente di andar oltre la pura intuizione geometrica legata alla figura, cui si affidavano gli antichi geometri, conduce a scoprire le relazioni algebriche fra gli elementi del problema che portano all'equazione risolu-

trice. Ma il progetto cartesiano, come egli scriverà a Mersenne nel 1638, non è di fermarsi «a spiegare argomenti già noti, né di restituire i Libri perduti di Apollonio, come hanno fatto Viète, Snellio e Ghetaldus, ma di passar oltre in ogni campo».

Per mostrare «a sufficienza» che non si tratta di una vana presunzione, Descartes comincia dal problema di Pappo che «nessuno degli Antichi aveva risolto»: date in generale 2n rette, determinare il luogo di un punto tale che il prodotto delle sue distanze da n di tali rette stia in un determinato rapporto con il prodotto delle distanze del punto da n altre rette.

Pappo afferma che nel caso di tre o quattro rette, il luogo richiesto è una conica, ma — osserva Descartes — «non fa nulla poi per determinarla e descriverla», né tantomeno affronta il caso di un numero superiore di rette date.

Passando concretamente alla risoluzione del problema, Descartes, seguendo le prescrizioni metodologiche enunciate in generale, comincia col supporlo «come già risolto»: «per liberarmi dalla confusione di tutte queste linee, considero una delle rette date e una di quelle che bisogna trovare, per esempio AB e CB, come le principali, e a queste cerco così di riferire tutte le altre. Il segmento della linea AB, che sta tra i punti A e B, sia chiamato x, e BC sia chiamato y» (Descartes [1637], 1983, 553-554).

La comparsa di quelli che saranno detti gli assi cartesiani — qui obliqui tra loro, ma in seguito Descartes sarà esplicito sulla maggiore semplicità che deriva dal considerarli ortogonali — rende con grande chiarezza la distanza che separa la geometria «analitica» cartesiana dalle tecniche «sintetiche» degli Antichi. Mentre per questi tutti i segmenti che compaiono nella figura sono pensati allo stesso modo e si tratta poi di trovare la relazione sussistente fra i vari elementi della figura, per Descartes la considerazione di alcune rette come date e altre incognite e la riduzione a queste ultime dei segmenti considerati (secondo le condizioni imposte dal problema) porta natural-

mente all'equazione della curva che descrive il luogo cercato. Poichè all'aumentare del numero delle linee considerate, il luogo può essere dato da una curva «più composta» di una conica — cioè da una curva la cui equazione è di grado superiore a due — Descartes si vede costretto a «dire qualcosa in generale intorno alla natura delle curve». Ciò che costituisce il contenuto del II libro.

Tradizionalmente, secondo una distinzione che abbiamo visto ancora accettata da Fermat, le curve si dividevano in luoghi piani o solidi (rette o coniche) e lineari (le curve rimanenti) ed erano rispettivamente chiamate geometriche o meccaniche: una denominazione che lascia perplesso Descartes. Se meccaniche sono le curve che si tracciano con qualche strumento, non dovrebbero esserlo anche rette e cerchi, che possiamo disegnare solo con l'aiuto di una riga o di un compasso? E che dire delle coniche, ottenute tagliando un cono indefinito mediante un piano qualunque non passante per il vertice?

Si tratta di una classificazione certamente insoddisfacente per lo spirito metodico di Descartes e che egli non può accettare come base per decidere quali siano le linee che «debbano essere accolte» in geometria e quali appartengano solo «alle Meccaniche».

«Per tracciare tutte le curve che qui pretendo introdurre — egli scrive ([1637], 1983, 560-561) — è sufficiente supporre solo questo, che due o più linee possano muoversi l'una ad opera dell'altra, e che le loro intersezioni determinino altre curve». Proprio questo egli ottiene con il suo celebre «compasso», uno strumento che combina insieme i movimenti di un compasso ordinario e di un regolo mobile, col quale si tracciano non solo il cerchio ma anche curve «che sarebbero grado a grado fino all'infinito più complesse». Del resto, già nella *Dioptrique* Descartes aveva insegnato modi diversi per costruire l'ellisse e l'iperbole: ciò che importa non è tanto lo strumento, quanto l'ordine concettuale che si deve seguire per comprendere insieme e classificare tutte le possibili curve «che si danno in natura».

Ancora ad una istanza di carattere metodologico risponde dunque una delle più profonde intuizioni della *Géométrie*: la classificazione delle curve algebriche in «generi». «Per suddividerle ordinatamente in determinati generi — dice Descartes — non conosco nient'altro di meglio che dire che tutti i punti di quelle curve che possiamo chiamare Geometriche (rispondenti cioè a misure precise ed esatte) stanno necessariamente con tutti i punti di una retta in una certa relazione che può essere espressa per tutti i punti per mezzo di una singola equazione» (Descartes [1637], 1983, 568-69).

Descartes riesce in tal modo a cogliere la differenza profonda che distingue le curve algebriche — rappresentabili da un'equazione algebrica e ammissibili in geometria — da quelle che egli chiama meccaniche (o come si dice da Leibniz in poi, trascendenti) e scopre la natura algebrica di curve come la cissoide di Diocle o la concoide di Nicomede, che si presentano nella soluzione del problema di Delo della duplicazione del cubo, e che gli Antichi avevano a torto considerato come meccaniche.

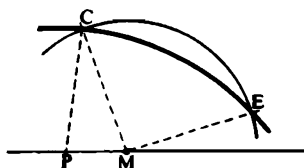
Una curva poi appartiene al primo genere, per Descartes, se l'equazione che la rappresenta è al più di 1° o 2° grado nelle incognite x e y, al secondo genere se l'equazione è di 3° o 4° grado, e così via al genere n-simo se l'equazione è di grado $2n$ o $2n-1$, in una suddivisione per gradi a due a due che gli è suggerita dal fatto che i punti di una conica si possono determinare con riga e compasso, quelli di una cubica o di una quartica intersecando un cerchio e una parabola, quelli di una curva di quinto o sesto grado con l'intersezione di un cerchio e una curva di terz'ordine (la «parabola cartesiana»); un procedimento che egli ritiene generalizzabile («e così delle altre all'infinito») per la convinzione (erronea, cui era indotto dall'esame delle equazioni dei primi 4 gradi) che un'equazione di grado n qualunque fosse sempre riducibile a un'altra di grado $n-1$.

La classificazione delle curve data così da Descartes, e che egli mostra essere indipendente dalla scelta del sistema di riferimento, non è certo oggi attuale e fu peraltro criticata anche dai contemporanei; essa tuttavia esprime uno degli aspetti concettuali fondamentali della geometria cartesiana, di cui egli immediatamente si serve per proseguire nella discussione del problema di Pappo e dimostrare che per tre o quattro rette il luogo cercato è una conica.

L'analisi che Descartes conduce è volutamente incompleta, giacché, come scrive a Mersenne, «la mia costruzione è simile al progetto di un architetto per un edificio, dove è prescritto solo quello che bisogna fare ed è lasciato ai carpentieri e ai muratori la sua attuazione». Del resto, aggiunge Descartes, se l'avesse data per intero «i maligni» avrebbero potuto vantarsi di conoscerla già da tempo; «invece in questo modo non possono dirne nulla senza

scoprire nel contempo la loro ignoranza». Un atteggiamento che si ripete poco più innanzi: «non mi sono infatti proposto di dir tutto» esclama interrompendosi dopo la trattazione dei primi casi che si presentano quando nel problema di Pappo si considerano cinque linee.

Egli passa invece a discutere una questione di grande rilevanza concettuale quando si studiano le curve: quella di tracciare rette che intersechino curve date in punti qualunque secondo angoli retti, che è la maniera peculiare con cui Descartes intende il problema delle tangenti, a suo dire «il problema più utile e generale, non solo tra tutti quelli che conosco, ma anche tra tutti quelli che in Geometria ho sempre desiderato conoscere».

Il metodo elaborato da Descartes per condurre la tangente a una curva in un punto C, e che egli illustra con l'esempio dell'ellisse e poi della parabola prima di presentarlo in generale, consiste essenzialmente nell'idea geniale e assolutamente originale che in un punto di tangenza c'è una intersezione doppia tra la retta tangente e la curva. Ecco come procede Descartes: sia data una curva di equazione $F(x,y) = 0$ e un punto C su di essa. Consideriamo poi una circonferenza qualunque con centro su uno degli assi, per esempio l'asse x, e le sue intersezioni con la curva, le cui ascisse sono ottenute risolvendo l'equazione che si ottiene eliminando la y dal sistema formato dall'equazione della curva e da quella del cerchio. In generale le due radici saranno distinte tra loro; «però — osserva Descartes — tanto più questi due punti C ed E

sono vicini tra loro, tanto minore è la differenza che sussiste tra queste radici». Infine, ed è questo il passo cruciale, «se questi punti *giacciono ambedue in uno* [cors. mio] (cioè se il cerchio che passa per C vi tocca la curva senza intersecarla), queste radici saranno assolutamente uguali» (Descartes [1637], 1983, 605). È chiaro poi che la tangente si trova semplicemente conducendo la perpendicolare al raggio del cerchio, cosa che spiega inoltre perchè Descartes parlasse di tracciare rette perpendicolari a curve invece che di tangenti.

Dal punto di vista algebrico, nel quale si pone Descartes, il problema della tangente si muta in quello della ricerca delle condizioni da imporre, per cui il cerchio tocchi la curva nel punto C, cioè delle condizioni da richiedere

affinché l'equazione risolutrice del sistema abbia due radici uguali. L'idea di Descartes è di uguagliare il primo membro dell'equazione a un dato polinomio in x che abbia due radici identiche e poi di uguagliare ad uno ad uno i coefficienti dei termini di ugual grado nelle due espressioni: si annuncia così il metodo oggi noto come *metodo dei coefficienti indeterminati*, mediante il quale egli riesce a trovare l'ascissa del centro e poi il raggio del cerchio tangente.

Descartes certamente immaginava che questo punto avrebbe attirato particolarmente l'attenzione dei matematici; egli si limitava tuttavia ad illustrare ulteriormente il metodo con qualche esempio e infine si dedicava allo studio delle curve ovali che aveva introdotto nella *Dioptrique*, «affinché sappiate che quanto abbiamo detto sulle curve non è senza applicazione».

Il problema della classificazione delle curve in generi, insieme a preoccupazioni di ordine metodologico, spostano nel III libro l'attenzione di Descartes sulla teoria delle equazioni. All'evidente importanza di uno studio ravvicinato delle equazioni per poter correttamente classificare le curve corrispondenti si affianca infatti un'esigenza puramente metodologica di «semplicità» delle soluzioni: «non è da dirsi — afferma Descartes — che ... sia consentito di servirsi indifferentemente della prima [curva] che si incontra» quando si risolve un problema; «al contrario bisogna aver cura di scegliere la più semplice che renda possibile la soluzione». E il criterio di semplicità che ha in mente Descartes non è certo affidato all'empirìa di una costruzione geometrica: non sono più semplici le curve che possono essere descritte «più agevolmente» o portano a una dimostrazione «più facile», ma quelle «che sono del più semplice genere che possa servire a determinare la quantità cercata».

Nell'ultimo libro della *Géométrie* Descartes si accinge dunque a «dire qualcosa in generale» sulle equazioni, cioè, nella sua definizione, le «somme di parecchi termini, parte noti e parte incogniti» che «considerati tutti insieme sono uguali a zero». Quest'ultima è precisazione di grande importanza, che era comparsa esplicitamente solo nell'*Artis analyticae praxis* di Thomas Hariot (1560-1621), un volume che Descartes affermò essergli sconosciuto all'epoca della redazione della *Géométrie*. È vero che il libro di Hariot «conteneva un calcolo per la geometria assai simile al mio», scriveva infatti a Costantin Huygens nel 1638, «ma l'autore penetra tanto poco in materia e insegna così poche cose in molte pagine, che non ho nessuna ragione di spiacermi dei suoi pensieri per il fatto che hanno preceduto i miei».

Di fatto l'accusa di aver apertamente seguito Hariot (senza citarlo) fu ripetutamente rivolta a Descartes da Wallis e in seguito fatta propria da Leibniz. Ancora senza citarlo Descartes seguiva Girard nell'enunciare che

«in ogni equazione possono darsi tante diverse radici quante sono le dimensioni della stessa incognita». Distinguendo poi tra radici vere (cioè positive) e «false (o inferiori a zero)» Descartes era condotto alla «regola» che ancor oggi porta il suo nome, e cioè che in ogni equazione algebrica vi «possono essere tante [radici] vere quante sono le variazioni dei segni + e − che vi si incontrano; e tante false quante volte due segni + o due segni − si susseguono» (Descartes [1637], 1983, 637).

Anche in questo caso non mancarono a Descartes le accuse di plagio da Hariot, mentre Roberval obiettò sulla generalità della regola e de Beaugrand scrisse a Mersenne che «le méthodiste» si era in più luoghi appropriato delle scoperte già fatte da Viète. Descartes in verità non rivendicava una particolare originalità al suo III libro, dove peraltro riprendeva tecniche ben note già agli algebristi italiani (come eliminare il secondo termine di un'equazione, o ridurre un'equazione di 4° a una di 3° grado). Nuova era invece ad esempio la sua osservazione che la conoscenza di una radice $x = a$ di un'equazione permette di abbassarne il grado mediante la divisione per x-a, così come originale è la terminologia da lui proposta e rimasta nell'uso di distinguere le radici in «reali» e «immaginarie» (queste ultime date da numeri «sordi»).

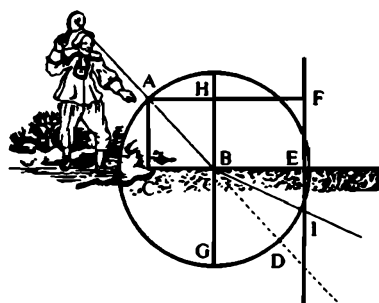
Descartes trattava infine dell'inserzione di due medie proporzionali tra due date linee, poiché ad essa si riconduce il problema della duplicazione del cubo, della trisezione dell'angolo e «tutti i problemi solidi». Quando invece il problema porta a un'equazione di grado superiore al quarto, sarebbe vano cercare di costruirlo ricorrendo alle sole sezioni coniche ed egli mostra come risolvere un'equazione di 6° grado «mediante l'intersezione di un cerchio e di una curva di un solo grado più composta della parabola», cioè la sua «parabola cartesiana». Per proseguire su questa via ad infinitum, per equazioni di grado superiore «occorre soltanto seguire lo stesso metodo», aggiungeva ottimisticamente Descartes. «Spero che i posteri mi saranno grati, non solo per quel che ho qui spiegato, ma anche per tutto ciò che ho omesso intenzionalmente al fine di lasciar loro il piacere della scoperta», era la sua ironica conclusione (Descartes [1637], 1983, 685).

4. *Polemiche sul problema delle tangenti.*

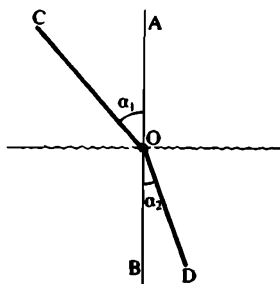
Descartes era pienamente consapevole dell'originalità e dell'importanza della sua *Géométrie*. Scriveva al padre Mersenne verso la fine del 1637 che la sua maniera di considerare e studiare la natura e le proprietà delle curve «è tanto superiore alla geometria ordinaria quanto la retorica di Cicerone è superiore all'abbiccì dei bambini».

Per tramite di Mersenne la *Géométrie* pervenne nelle mani dei maggiori matematici del tempo: Galileo, Cavalieri, Torricelli, Fermat, Roberval.

Mentre tuttavia i geometri italiani, sostenitori di una concezione della geometria radicalmente diversa da quella cartesiana, non sembrarono manifestare un particolare interesse (occorrerà aspettare la fine del secolo prima che le idee della geometria di Descartes si affermino stabilmente nella cultura matematica italiana) ben diversa fu la reazione dei matematici francesi, alcuni dei quali — come de Beaugrand e Fermat — avevano avuto modo di leggere parti dell'opera ancora durante la stampa.

Mersenne aveva infatti ricevuto i primi fogli a stampa del *Discours* e degli *Essays* per ottenere dal re, come d'uso, il privilegio per la stampa; l'opera giunse così nelle mani di de Beaugrand, come abbiamo visto «Consigliero e Secretario» del re, che comunicò il contenuto della *Dioptrique* a Fermat. Descartes, nel II Discorso, vi trattava della rifrazione della luce, enunciandovi la legge sul rapporto tra i seni degli angoli di incidenza e di rifrazione, cui era pervenuto già da diversi anni nel corso delle sue ricerche sull'ottica e la natura della luce. Descartes non si addentra in dettagli matematici molto raffinati in questo saggio destinato in primo luogo agli artigiani e fabbricanti di lenti e occhiali, e illustra il suo argomento con un esempio concreto e facilmente comprensibile a tutti: «supponiamo che una palla, spinta da A verso B, incontri nel punto B non più la superficie della terra, ma una tela CBE, così debole e sottile che la palla abbia la forza di romperla e di

attraversarla, perdendo solo una parte della sua velocità» (Descartes [1637], 1983, 210-12). Si tratta di decidere come la palla varii il suo cammino: sulla base di semplici considerazioni sulla velocità della palla, Descartes mostra che essa deve dirigersi verso il punto I.

«La sua prova e la sua dimostrazione mi sembrano un vero e proprio paralogismo», scrive Fermat a Mersenne commentando l'argomento cartesiano, non solo perché si basa su un'analogia — ciò che è estraneo alla geometria — ma soprattutto perché Descartes suppone che la luce viaggi

nell'aria o nei «corps rares» più lentamente che nell'acqua o nei «corps denses», che è esattamente il contrario di ciò che Fermat crede. Le obiezioni di Fermat diedero inizio ad una accesa discussione a più voci tra i matematici e i fisici dell'epoca, un fitto carteggio che occupa quasi duecento pagine del III volume della *Correspondance* di Descartes. Solo diversi anni dopo la morte del pensatore francese, Fermat, riprendendo l'argomento col suo metodo dei massimi e minimi sulla base di «quest'unico principio: la natura agisce sempre seguendo le vie più brevi», ottenne una dimostrazione della legge di rifrazione che, con sua grande sorpresa, gli dava esattamente la stessa legge trovata da Descartes, $\sin \alpha_1/\sin \alpha_2 = $ costante (dove α_1, α_2 sono gli angoli di incidenza e di rifrazione e la costante dipende dai mezzi). Nonostante la diversità di concezioni sulla velocità della luce, entrambi pensavano infatti che nel passaggio da un mezzo dove la velocità era minore a uno dove la velocità era maggiore la luce fosse deviata verso la verticale.

La discussione aperta dalla *Dioptrique* semplicemente annunciava quella, altrettanto vivace e appassionata (ma dal nostro punto di vista ben più significativa) sul problema delle tangenti — agli occhi dei contemporanei la questione più delicata e importante trattata da Descartes nella *Géométrie*.

La *Géométrie* era appena apparsa quando Fermat faceva avere al suo autore, tramite il padre Mersenne, una copia dell'*Isagoge* e del *Methodus*, nei quali, in maniera più semplice e diretta, insegnava a trovar la tangente per ogni curva, anche per la concoide: non era forse vero che in questo caso lo stesso Descartes aveva nella *Géométrie* rinunciato al suo metodo, riconoscendo che «ci si potrebbe invischiare in un calcolo tanto lungo» quando invece la costruzione geometrica è molto semplice? «Non mi sembra una ragione sufficiente per confrontarlo a quello della mia Geometria» è il secco commento di Descartes a Mersenne al metodo propostogli dal magistrato tolosano. Ai suoi occhi infatti non solo non ne possiede la generalità, ma

nemmeno la semplicità concettuale che non si identifica con l'empirica semplicità nei calcoli.

Descartes e Fermat muovevano da concezioni geometriche assai differenti, che si riflettevano in diverse pratiche di calcolo. Mentre per Descartes l'intersezione di curve è il problema concettualmente dominante nella *Géométrie*, al quale si lasciano ricondurre tutti gli altri (ivi compreso, come si è visto, quello delle tangenti) e si traduce poi in termini algebrici, per Fermat si tratta di trovare fra tutte le rette che tagliano una curva in un punto B quella per cui il rapporto DF/FE sia massimo (o minimo). Un approccio che suggerisce quello diventato oggi familiare in analisi. Descartes, con il suo metodo, lascia invece intravedere il concetto di tangenza fra curve che sarà proprio della geometria algebrica.

Per mettere alla prova la generalità del metodo del suo avversario Descartes scrive a Mersenne di invitare il «votre conseiller de Minimis» a risolvere questo problema: trovare le tangenti alla curva definita come il luogo dei punti tali che la somma dei cubi delle distanze da due rette fisse ortogonali sia uguale al rettangolo di queste distanze moltiplicato per una linea data. È il celebre *folium* di equazione $x^3 + y^3 = nxy$, «un'espèce d'ovale» dice a prima vista Roberval cercando di disegnarla. Ma l'intuizione di Roberval è errata, come peraltro la figura illustrativa con cui Descartes nella lettera a Mersenne accompagna la sua proposta.

Nella discussione tra Fermat e Descartes s'erano ben presto infatti inseriti anche Roberval ed Etienne Pascal che, come la gran parte dei matematici parigini, condividevano le opinioni del primo.

Poco familiare con l'uso dei segni nelle coordinate, al primo cappio Roberval ne aggiunse altri tre simmetrici rispetto agli assi e all'origine, ottenendo per l'ingarbugliata curva di Descartes una specie di nodo («galand») o di fiore («fleur de jasmin»); d'altra parte neppure chi l'aveva proposta era in grado di tracciarla esattamente, anche se si divertiva a cambiarne l'equazione (riferendola alle bisettrici degli assi con un cambiamento di coordinate di cui aveva accennato nella *Géométrie*) per mettere ulteriormente in imbarazzo l'avversario (v. fig.). Questi, da parte sua, faceva conoscere a Descartes le sue scoperte sulla cicloide (la «roulette», la curva che «y'inventay») invitandolo a trovarne la tangente, cosa che quest'ultimo

insegnava a tracciare non già col proprio metodo, ma con una costruzione geniale e semplicissima: sia C il punto medio della *roulette* e CD il diametro del cerchio generatore. Per costruire la tangente in B basta mandare la parallela BN ad AD, congiungere N con D e da B tracciare la BO parallela a ND. La perpendicolare BL a BO dà la tangente richiesta. Anche per la quadratura della cicloide, di cui si vantava Roberval, non ci sono particolari difficoltà: nel luglio del 1638 Descartes ne scrive a Mersenne, utilizzando allo scopo esattamente lo stesso principio che abbiamo visto Cavalieri enunciare nel suo VII libro della *Geometria degli indivisibili*, forse allora già noto al filosofo del metodo.

In quello stesso mese la polemica giungeva ad una svolta. Fermat scriveva direttamente a Descartes, inviandogli una versione in francese del proprio metodo: « Vedendo l'ultima maniera da voi usata per trovare le tangenti delle linee curve — gli rispondeva il filosofo — non ho altro da rispondere se non che è molto buona e che se voi fin dall'inizio l'aveste spiegata come ora avete fatto non l'avrei contraddetta in alcun modo» (in Fermat 1679, 16).

Qualche tempo prima Descartes, in una lettera all'amico Claude Hardy (1598-1678), un matematico che aveva preso le sue parti nella polemica, aveva infatti presentato una propria interpretazione del metodo *de maximis et minimis*, riducendo la ricerca della tangente a «lo stesso calcolo che io ho eseguito» e spiegando in modo rigorosamente algebrico l'eliminazione dei termini contenenti E, «la quale non si fa per nulla gratis». Un metodo che, con qualche esagerazione, scriveva a Mersenne di conoscere da vent'anni, ben prima dunque di Fermat, benché per questo non si fosse affatto sentito «plus sçavant» e non avesse creduto che la cosa meritasse «tutti gli elogi che lui gli attribuisce».

La riflessione sulle tangenti matura in quel periodo in un problema più difficile e profondo, *il problema inverso delle tangenti*, che si affaccia con Fermat: («data la proprietà della tangente, determinare la curva che deve convenire a questa proprietà») e con Florimond Debeaune (1601-1652), che lo presenta in questi termini a Descartes: trovare la quadratura di una curva, la cui ordinata sta alla sottotangente come una data retta alla differenza tra ascissa e ordinata. In altre parole, integrare l'equazione

differenziale: $y' = a(x - y)$ che porterà Debeaune a trovare le curve che portano il suo nome.

Se queste ricerche hanno perso agli occhi di Descartes ogni interesse teorico («io mi interesso poco a tutte queste questioni particolari» scriverà nel 1640), esse continuano nondimeno ad appassionare i matematici parigini e nello stesso anno Roberval comunica a Fermat di aver trovato un metodo «non così sottile e profondo» come il suo o quello di Descartes (che pure al confronto è «più lungo, più confuso e più difficile») ma che tuttavia consente di determinare le tangenti quasi senza «metter mano alla penna».

L'idea di Roberval si basa sulla «règle générale» seguente: dalle proprietà geometriche della curva si ricavano i diversi movimenti del punto che la descrive. Componete questi movimenti in un solo, dice Roberval e «tracciate la linea della direzione del movimento composto; otterrete la tangente alla linea curva». Un metodo «veramente filosofico» a dire di Chasles (1875, 59), che «quanto al principio metafisico» presenta una grande analogia con le flussioni di Newton (cfr. il cap. XVI di questo volume) ma che, in mancanza di un'adeguata strumentazione analitica, si rivela non altrettanto fecondo nelle mani di Roberval.

Una tarda eco delle lontane polemiche che avevano accompagnato l'apparizione della *Géométrie* si trova, dopo la morte di Descartes, in uno scritto di Fermat, *De solutione problematum geometricorum per curvas semplicissimas*, originato forse dall'edizione latina (1659) della geometria cartesiana arricchita di note e aggiunte di Debeaune, van Schooten, Johann Hudde (1628?-1704) borgomastro di Amsterdam, e Heinrich van Heuraet (1633-?). Furono questi uomini, insieme al celebre pensionario d'Olanda Jean de Witt (1625-1672) e a Christian Huygens i primi seguaci e propugnatori delle concezioni di Descartes, cui forse Fermat si rivolgeva scrivendo: «Può essere paradossale affermare che anche in geometria Descartes non è stato che un uomo», ma per rendersene conto «i più sottili cartesiani» non devono far altro che esaminare le «imperfezioni nella classificazione delle curve in certe classi e gradi operata dal loro maestro».

Le critiche alla classificazione cartesiana delle curve erano numerose, puntuali e illustrate da esempi e il tono dello scritto fieramente polemico. Ciononostante Fermat riconosceva apertamente il «portentosissimo ingegno» dell'avversario, tanto «da stimare molto di più Descartes anche quando sbaglia» che i molti che si limitano a seguire, anche se in modi corretti, una via già tracciata.

5. *L'arte di tagliar pietre e l'*esprit de géométrie*: Desargues e Pascal.*

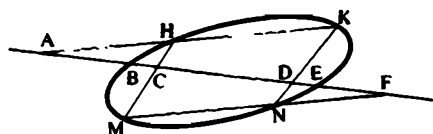
Assistendo all'assedio di La Rochelle nel 1628 Descartes aveva conosciuto Gérard Desargues (1593-1662) un geniale autodidatta di Lione, arruolato come ingegnere militare nelle truppe del cardinale Richelieu.

Desargues aveva studiato le opere dei geometri classici e poi si era dedicato all'architettura e ai problemi teorici della prospettiva e della pittura giacché, come ebbe a scrivere, non provava piacere allo studio della geometria «se non in quanto può porgere allo spirito un mezzo» per giungere a cognizioni «che si possono tradurre in atto per la conservazione della salute o nella applicazione per la pratica di qualche arte». Un'attenzione alla pratica continuamente riconoscibile nelle ricerche di Desargues, che, a parere di Descartes, erano tuttavia sempre animate da una vera «metafisica della geometria».

A Parigi Desargues aveva consolidato l'amicizia con Descartes — al cui fianco si schierò nelle polemiche che videro protagonista l'autore della *Géométrie* — ed era entrato a far parte del gruppo di matematici riuniti attorno a Mersenne. Desargues rese note le sue scoperte in fogli a stampa che circolarono tra i matematici parigini. Solo nel 1639 pubblicò un breve trattato dal singolare titolo *Brouillon projet d'une atteinte aux événements des rencontres du cône avec un plan*. L'idea fondamentale, da cui prendeva le mosse Desargues, era di considerare le coniche come ottenute tutte dalle possibili sezioni di un cono con un piano (ivi comprese, come coniche «degeneri», le coppie di rette); ciò che gli permetteva di studiare in maniera unitaria le coniche, considerate proiettivamente equivalenti a un cerchio. Si tratta di una concezione oggi assolutamente naturale in geometria, ma che risultava in quegli anni del tutto nuova.

Si presentò allora a Desargues, spontaneamente, una questione che egli propose a Mersenne e agli amici parigini: se si considera invece che un cono a base circolare un cono qualunque, a base ellittica, parabolica o iperbolica, si può tagliarlo secondo un cerchio, e se sì, quale dev'essere la posizione del piano? La difficoltà di questo problema mise in imbarazzo gli interlocutori di Desargues. Descartes riuscì invece a risolverlo, nel caso di un cono parabolico, coi metodi della sua nuova geometria mediante l'intersezione di un cerchio e di una parabola.

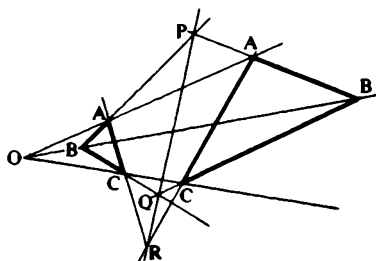
Lo stesso Descartes si complimentava con l'amico per la «buonissima» idea di considerare un sistema di rette parallele semplicemente come un fascio di rette intersecantesi in un punto all'infinito. Scriveva al padre Mersenne che «la maniera con cui comincia il suo ragionamento, applicandolo insieme alle rette e alle curve, è tanto bella quanto generale». Uno dei risultati più importanti e fecondi, cui era pervenuto Desargues, era infatti il

suo teorema sull'« involuzione di sei punti », cioè sulla relazione tra i segmenti ottenuti tagliando una conica e un quadrilatero in essa iscritto con una retta qualunque del piano: « Il prodotto dei segmenti della trasversale compresi tra un punto della conica e due lati opposti del quadrilatero sta al prodotto dei segmenti compresi tra lo stesso punto e gli altri due lati opposti del quadrilatero nello stesso rapporto dei prodotti fatti in modo analogo col

secondo punto in cui la trasversale taglia la conica ». Un teorema che abbiamo visto Fermat enunciare tra i suoi *Porismi*. Lo stesso Fermat esprimeva a Mersenne la sua grande stima per il geniale autodidatta, « tanto più che egli è il solo inventore delle sue coniche. Il suo libretto — aggiungeva il giudice tolosano a proposito del *Brouillon* — che passa, mi dite, per gergo, mi è sembrato comprensibilissimo e molto ingegnoso ».

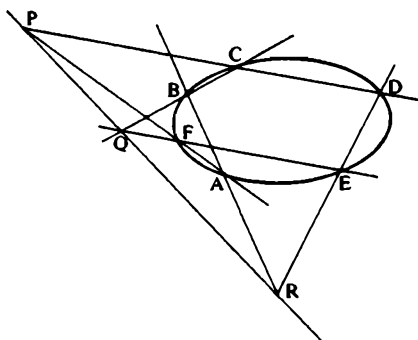
Nel *Brouillon* Desargues presentava infatti gli elementi essenziali della teoria proiettiva delle coniche (costruzione di una conica, polarità, diametri, fuochi e così via) e concludeva con un esplicito richiamo all'applicazione delle sue scoperte geometriche nella pratica della prospettiva, della costruzione degli orologi e del taglio delle pietre in architettura.

Le concezioni di Desargues erano fortemente originali. Il linguaggio con cui le presentava era fantasioso e personale, talvolta oscuro. Non mancarono così incomprensioni che, nel clima di accesa e frequente polemica fra i matematici della Parigi di quegli anni, si trasformarono in aperta opposizione. Tra i più ostinati detrattori di Desargues ci fu il signor de Beaugrand, avversario di Descartes e autore di pubbliche lettere a stampa contro l'autore del *Brouillon*.

Desargues rispondeva ai suoi critici con un opuscolo redatto nel 1640: *Brouillon projet d'exemple d'une manière universelle touchant la pratique du trait à preuves pour la coupe de pierres en l'architecture*, che piuttosto che chiudere, riaccendeva la polemica di cui si faceva interprete un tal J. Curabelle, noto nella storia della matematica solo per la miseria intellettuale degli argomenti obiettati a Desargues. Il gruppo dei detrattori del geometra doveva tuttavia essere abbastanza potente, per costringere il celebre incisore Abraham Bosse (1621-1678), professore di prospettiva all'*Académie royale de peinture* e fervente ammiratore della geometria di Desargues, a rinunciare ad insegnarne le teorie all'*Académie*.

Molti dei risultati, che Desargues aveva affidato a fogli volanti, sarebbero stati dimenticati se non fossero stati raccolti da Bosse in un *Traité de perspective* (1656), cui era allegata una *Perspective adressée aux théoriciens* nella quale Bosse difendeva Desargues dai suoi critici. Tra i più importanti risultati, ispirati ai princìpi e ai metodi di Desargues e resi noti da Bosse figura il cosiddetto «teorema dei triangoli omologici»: «Se due triangoli ABC e A'B'C' nel piano o nello spazio hanno i vertici posti a due a due su tre rette concorrenti in un punto O, le coppie di lati corrispondenti si incontrano in tre punti P, Q, R collineari e viceversa».

Per due triangoli nello spazio il teorema è di evidenza immediata, mentre più complessa è la dimostrazione nel caso di triangoli complanari. Sembra che Desargues fosse condotto al suo teorema sui triangoli ragionando sul seguente fatto, di frequente applicazione nella prospettiva pratica: se due figure piane sono nello spazio l'una la prospettiva dell'altra, allora se si ruota il piano della prima attorno alla retta d'intersezione col piano della seconda, le rette congiungenti punti corrispondenti delle due figure concorrono tutte in un punto; proprietà che si verifica anche per figure complanari.

Se Bosse era un discepolo convinto ma un geometra mediocre, non altrettanto poteva certo dirsi di un altro seguace dei metodi di Desargues, il giovane Blaise (1623-1662) figlio di Etienne Pascal, che aveva conosciuto l'autore del *Brouillon* partecipando col padre ai periodici incontri dei matematici parigini che si tenevano presso Mersenne.

Appena sedicenne, Blaise Pascal annunciava alcune delle sue scoperte geometriche con un foglio a stampa, l'*Essay sur les coniques*, in cui affermava apertamente di aver cercato di imitare nello studio delle coniche il metodo di Desargues, «un des grands esprits de ce temps». L'*Essay* constava di tre definizioni, tre lemmi e l'enunciato di cinque teoremi che ne conseguivano. Nel primo lemma Pascal presentava il suo *hexagramme mystique*, cioè la proprietà di ogni esagono iscritto in una conica di avere i lati opposti che si

incontrano in una retta (che può essere anche la retta all'infinito o *retta impropria* come si dice oggi e come avviene per esempio per un esagono regolare iscritto in un cerchio).

L'*hexagramme mystique* costituiva agli occhi di Pascal il fondamento della teoria delle coniche, il magico strumento con cui scoprire le proprietà delle tangenti e delle secanti, delle polari e dei diametri di una conica. Egli progettò anche un'opera completa sulle coniche, di cui scrisse solo alcune parti. Durante il suo soggiorno parigino Leibniz riuscì ad avere tra le mani i fogli sulle coniche lasciati da Pascal. Gli appunti allora redatti da Leibniz ne costituiscono l'unica testimonianza rimastaci.

Dalle sue ricerche sulle coniche Pascal era continuamente distratto da altri interessi. Nel maggio del 1649 otteneva il privilegio del re per la costruzione di una macchina calcolatrice alla quale aveva lavorato per alcuni anni e della quale furono fabbricati diversi esemplari (alcuni si trovano ancor oggi al *Conservatoire des Arts et Métiers* di Parigi). Parallelamente era attratto dalle notizie che giungevano dall'Italia sulle esperienze col barometro fatte da Torricelli. Si dedicò allora a studi di idrostatica, che culminarono nel celebre esperimento del Puy de Dôme, con il quale confermò l'esistenza della pressione dell'aria e in altri esperimenti tesi a spiegare il paradosso idrostatico.

Nell'estate del 1654 Pascal scriveva a Fermat comunicandogli un problema che gli era stato posto da un suo amico, il Chevalier de Méré: come deve essere suddivisa la posta tra due giocatori che giocano un gioco che prevede un certo numero di partite, se essi decidono di interrompere il gioco prima che uno dei due abbia vinto tutte le partite necessarie a guadagnare l'intera posta? Il «problema delle partite» così come analoghi problemi sul gioco dei dadi erano stati discussi oltre cent'anni prima da Cardano e più recentemente, in un semisconosciuto opuscolo di Galilei; ma Fermat e Pascal

sembrano ignorarli entrambi e cominciano la loro discussione in un fitto carteggio che segna di fatto la nascita della teoria della probabilità.

Né Fermat né tantomeno Pascal diedero una presentazione sistematica dell'argomento. Nelle loro lettere si trovano comunque numerose e brillanti considerazioni di calcolo combinatorio e interessanti proprietà dei numeri. Così per esempio Pascal enuncia il teorema che la somma dei primi n numeri è data da n(n+1)/2 e mostra di conoscere la relazione $2^n = \sum_{k=0}^{n} C_{n,k}$ sulla somma delle combinazioni di n elementi a k a k così come la seguente: $C_{m,n}=C_{m-1,n}+C_{m-1,n-1}$ da lui trovata per via ricorrente col metodo della «induzione completa» e della quale si serve per costruire il «triangolo aritmetico», che non è altro che il triangolo dei coefficienti del binomio, già noto a Tartaglia e a Stifel. Dallo studio sistematico delle proprietà di tale triangolo Pascal perviene a numerose proprietà delle combinazioni, a partire dalla formula fondamentale

$$C_{m,k} = \frac{m(m-1)\ldots(m-k+1)}{1.2.3.\ \ldots k}.$$

«Metterò ordine in tutto ciò che ho fatto — scriveva Pascal a Fermat nel 1654 commentando le sue scoperte aritmetiche — quando avrò concluso i trattati geometrici ai quali lavoro da qualche tempo». Ma nessuna delle due promesse doveva essere mantenuta.

Spirito inquieto e tormentato da angosce di natura esistenziale e religiosa, quello stesso anno Pascal abbandonò gli studi di matematica per dedicarsi alla teologia e alla filosofia, ritirandosi nell'abbazia di Port Royal. Nel 1658, durante le notti che trascorreva insonni per le sofferenze fisiche derivategli da condizioni di salute già gravemente compromesse, Pascal cominciò a meditare intorno a un problema che abbiamo visto essere alla moda: quello della «roulette» o cicloide, curva di cui egli trovò diverse proprietà. Anziché pubblicarle, Pascal preferì farne oggetto di una pubblica sfida, in cui invitava «tutti i geometri dell'universo» a risolvere i seguenti quesiti: trovare la quadratura dell'arco di cicloide, il suo centro di gravità, il volume dei solidi ottenuti dalla rotazione della cicloide attorno all'asse e alla base e i loro baricentri. Al vincitore era assicurato un premio di 60 pistole, affidato al giudice della gara, il matematico Pierre de Carcavy (?-1684).

Sembra che Pascal, in quel periodo, meditasse di scrivere una grande opera sull'ateismo e che la sfida gli fosse suggerita da un amico, il duca di Roanez, per assicurarsi una grande autorità in campo scientifico mostrando di saper risolvere problemi davanti ai quali si arrestavano i più celebri geometri. Comunque stiano le cose, alcuni dei quesiti proposti da Pascal erano già stati risolti da Roberval, anche se, come d'abitudine, egli non li

aveva pubblicati, e in parte anche da Torricelli, e (come abbiamo visto) da Fermat e Descartes.

Venutone a conoscenza, Pascal fece sapere che la sfida riguardava solo la determinazione del volume e del baricentro dei solidi di rotazione sopra menzionati, tagliati da piani passanti per l'asse della cicloide. Prima della scadenza del termine proposto per la sfida, Pascal dava alle stampe una *Histoire de la roulette*, una versione personale e largamente inattendibile della storia di questa curva, con accuse di plagio rivolte a Galileo e Torricelli, alle quali rispondeva il letterato italiano Carlo Dati (1619-1676) con una *Lettera ai Filaleti* scritta sotto lo pseudonimo di Timauro Antiate. A difesa di Galileo, Dati produceva la testimonianza di Vincenzo Viviani (1622-1703), che aveva vissuto con Galileo per tre anni prima della sua morte «e mi ha detto di averlo più volte udito discorrere della cicloide e particolarmente trattandosi del disegno del nuovo ponte di Pisa» in una sola arcata, per cui a parere di Galileo «questa linea somministrava una centinatura per un ponte di bellissimo garbo». Altrettanto netta era la posizione di Torricelli, che nell'*Opera geometrica* dichiarava come stavano le cose, riferendosi all'*Epistola ad Torricellium* (1647) che gli aveva inviato Roberval.

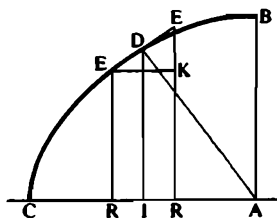
Nell'*Histoire* Pascal dava inoltre notizia di risultati a lui comunicati da matematici che pure non intendevano partecipare alla sfida, come Michelangelo Ricci o il belga René de Sluse (1622-1685), geometra che aveva a lungo studiato in Italia ed era familiare con le opere di Cavalieri e Torricelli.

Le polemiche sollevate dall'*Histoire* erano soltanto l'annuncio di quelle che dovevano accompagnare la fine di questa vicenda. Essa non rappresenta certo una pagina di cristallina chiarezza nella vita di Pascal. Nel novembre del 1658 infatti Carcavy, insieme a «delle persone molto colte in geometria» (rimaste peraltro ignote) pronunciava il giudizio sulle uniche risposte pervenute, quelle di de Louvère e di Wallis (che aveva saputo della sfida da Kenelm Digby), giudicandole entrambe insufficienti. Il premio poteva pertanto ritornare nelle mani di Pascal che pubblicò le risposte nelle *Diverses inventions en géométrie*, scritte sotto forma di *Lettres de Amos Dettonville* (anagramma di Luis de Montalte, lo pseudonimo da lui usato pubblicando le *Lettres provinciales*).

Per ottenere i risultati cercati Pascal, nelle *Lettres à Monsieur Carcavy*, si serviva degli indivisibili, ispirandosi non tanto alla *Geometria* di Cavalieri quanto a un manoscritto *Traité des indivisibles* di Roberval e ai recenti *Cylindricorum et annularium libri quattuor* (1651 e 1659) pubblicati ad Anversa dal gesuita André Taquet (1612-1660). Come Taquet e Roberval e contrariamente a Cavalieri, Pascal rifiutava di concepire una figura come composta di *heterogenea*, elementi di dimensione minore, come erano le infinite linee (o superfici) per le figure piane (o per i solidi) di Cavalieri.

Questioni di omogeneità portavano invece Pascal a pensare gli indivisibili di una figura piana come un'infinità di rettangoli infinitesimi, la cui somma differiva dalla figura data per meno di una quantità assegnata, e per la quadratura Pascal parlava di «somma delle linee» o di «somma delle ordinate». Nei procedimenti di quadratura Pascal era dunque condotto a trascurare quantità infinitesime, ciò che egli giustificava di fronte ai suoi critici invocando «l'esprit de finesse», l'intuizione del fatto geometrico in luogo dell'«esprit de géométrie», il ragionamento geometricamente rigoroso. I paradossi della geometria, egli affermava, sono solo apparenti, come incomprensibili alla nostra ragione appaiono i misteri della fede: infiniti e infinitesimi sono misteri che la natura ci presenta per contemplarli, non per comprenderli. Il rapporto che intercorre fra indivisibili e figure geometriche non è diverso da quello esistente tra la giustizia umana e quella divina.

Dilettante di genio, Pascal ottenne sulla cicloide e i solidi di rotazione da essa generati risultati certamente di rilievo che egli tuttavia presentava in un linguaggio ormai antiquato, incapace di cogliere a fondo l'importanza delle nuove vie aperte alla geometria dalle procedure algebriche di Descartes e Fermat.

A questo stesso periodo risale il *Traité de sinus du quart de cercle*, nel quale Pascal discuteva ciò che in termini moderni è l'integrazione della funzione $y=\sin x$.

Per determinare la «somma delle ordinate» dell'arco di curva CB Pascal si basava sul lemma che il rapporto tra AD e DI è uguale a quello tra EE e EK e che per archi infinitesimi il segmento di tangente EE può essere considerato uguale all'arco. Era questa la figura che Leibniz aveva davanti agli occhi quando ebbe la prima intuizione del calcolo differenziale: Pascal aveva invece in mente un problema di quadratura e sembrava procedere con gli occhi bendati, scriverà Leibniz a Bernoulli nel 1703. Come vedremo, sarà infatti la considerazione del «triangolo caratteristico» EEK il primo passo nell'invenzione di Leibniz.

Dopo la *querelle* sulla cicloide Pascal si allontanò definitivamente dagli

studi geometrici che avevano animato i suoi giovanili furori: «per parlarvi francamente della geometria — scriveva a Fermat nel 1660 — vi dirò che la trovo il più alto esercizio dello spirito, ma al tempo stesso la riconosco per così inutile, che faccio poca differenza tra un uomo che non è che un geometra e un abile artigiano». Certo, egli continuava, è il più bel mestiere del mondo, «ma, infine, non è altro che un mestiere».

BIBLIOGRAFIA

Testi

R. DESCARTES, *Œuvres*, a cura di C. Adam e P. Tannery, Paris, Cerf, 1897-1913, 12 voll. e supplemento.

ID., *Opere filosofiche*, a cura di B. Widmar, Torino, UTET, 1969.

ID., *Opere scientifiche*, vol. I a cura di G. Micheli, Torino, UTET, 1966; vol. II a cura di E. Lojacono, Torino, UTET, 1983.

P. DE FERMAT, *Œuvres*, a cura di P. Tannery e C. Henry, Paris, Gauthier Villars, 1891-1922, 4 voll. e supplemento.

ID., *Varia opera mathematica*, Tolosae 1679 (repr. Bruxelles, Culture et civilisation, 1969).

Studi

L. AUGER, *Un savant méconnu, Gilles Personne de Roberval (1602-1675)*, Paris, Blanchard, 1962.

H.J.M. BOS, *On the Representation of Curves in Descartes' Géométrie*, in «Archive for History of Exact Sciences», vol. 24, 1981, pp. 295-338.

C. BOYER, *History of Analytic Geometry*, New York, Scripta Mathematica, 1956.

ID., *The History of the Calculus and Its Conceptual Development*, New York, Dover, 1959.

ID., *A History of Mathematics*, New York, Wiley and Sons, 1968 (trad. it.: *Storia della matematica*, Milano, ISEDI, 1976).

M. CANTOR, *Vorlesungen über Geschichte der Mathematik*, vol. II, Leipzig, Teubner, 1900, 2ª ediz.

M. CHASLES, *Aperçu historique sur l'origine et le développement des méthodes en géométrie*, Paris, Gauthier Villars, 1975, 2ª ediz.

J.L. COOLIDGE, *A History of the Conic Sections and Quadric Surfaces*, New York, Oxford University Press, 1945 (rist. Dover, 1968).

L. GEYMONAT, *Storia e filosofia dell'analisi infinitesimale*, Torino, Levrotto & Bella, 1947.

M. KLINE, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, New York, Oxford University Press, 1972.

A. KOYRÉ, *Etudes Galiléennes*, Paris, Hermann, 1966 (trad. it.: *Studi galileiani*, Torino, Einaudi, 1976).

G. LORIA, *Storia delle matematiche dall'alba delle civiltà al tramonto del secolo XIX*, Milano, Hoepli, 1950.

ID., *Storia della geometria descrittiva dalle origini sino ai giorni nostri*, Milano, Hoepli, 1921.

M.S. MAHONEY, *The Mathematical Career of Pierre de Fermat (1601-1665)*, Princeton, Princeton University Press, 1973.

L.E. MAISTROV, *Probability Theory· a Historical Sketch*, New York, Academic Press, 1974.
O.B. SHEYNIN, *Early History of Probability*, in «Archive for History of Exact Sciences», vol. 17, 1977, pp. 201-259.
R. TATON, *L'œuvre de Pascal en géométrie projective*, in «Revue d'Histoire des Sciences», vol. 15, 1962, pp. 197-252.
ID., *L'œuvre mathématique de G. Desargues*, Paris, Presses Universitaires de France, 1951.
J. VUILLEMIN, *Mathématiques et métaphysique chez Descartes*, Paris, Presses Universitaires de France, 1960.
A. WEIL, *Number Theory An Approach through History from Hammurapi to Legendre*, Basel, Birkhäuser, 1983.

X. *I logaritmi* (di UMBERTO BOTTAZZINI)

1. *Thomas Hariot e i matematici del Gresham College.*

Nel 1585 il *virtuoso* Sir Walter Raleigh (1522-1618), audace navigatore e fondatore della Virginia (la prima colonia inglese nel Nuovo Mondo), inviò il proprio precettore di matematica come sopraintendente in una spedizione nella colonia americana col compito della rilevazione e della misurazione dei terreni. Al ritorno l'anno seguente questi pubblicava un rendiconto del viaggio nell'opuscolo *A brief and true report of the new found land of Virginia*, comprendente un accurato studio delle risorse economiche del nuovo territorio. Il *Report* rappresentò l'unica pubblicazione scientifica di Thomas Harriot o Hariot, il matematico che aveva acquistato grande fama fin dal tempo dei suoi studi alla St. Mary's Hall di Oxford e che Raleigh aveva voluto al suo servizio.

Nelle sue lezioni a Raleigh e ai capitani delle sue navi Hariot aveva collegato con successo teoria e pratica, «non senza ottenere risultati che hanno dell'incredibile» come scrisse Richard Harklyut, uno dei sottoscrittori dei capitali della Virginia Company di Raleigh. Nel Nuovo Mondo Hariot aveva affascinato gli indiani con i suoi «strumenti matematici, le bussole, ..., la magnetite, cannocchiali con cui si vedevano molte cose strane, specchi ustori, ..., pistole, libri, scritti e letture, orologi a molla che sembravano camminare da soli e molte altre cose» (Kargon [1966], 1983, 31).

Gli strumenti di Hariot costituivano il bagaglio indispensabile per il lavoro del matematico pratico, il «practitioner» della fine del Cinquecento,

impegnato a seguire gli astri, disegnare carte, tracciare le rotte delle navi sulle vie di un crescente commercio e dell'esplorazione di nuovi mondi, tenere libri mastri e progettare macchine, costruire lenti e compassi, quadranti e astrolabi.

Attraverso Sir Raleigh, Hariot fu introdotto nel circolo di intellettuali e scienziati che si riuniva a Sion House, la residenza di Henry Percy conte di Northumberland. Nel 1590, quando Raleigh cadde in disgrazia, Hariot passò al servizio del «conte stregone» con una pensione di ottanta sterline annue. Percy si dilettava di astronomia e alchimia e si era dotato di una ben fornita biblioteca comprendente non solo i testi classici ma anche le opere più recenti di Tycho Brahe, Kepler, Bruno e Paracelso. Il radicale copernicanesimo del filosofo italiano, che aveva suscitato ampie discussioni durante il suo soggiorno ad Oxford nel 1583, esercitò una forte influenza sull'orientamento antiaristotelico del gruppo di Percy, di cui Hariot era indiscutibilmente la figura più autorevole.

Abile astronomo, Hariot aveva cominciato nel 1609 osservazioni sistematiche col telescopio, scoprendo le macchie solari e i satelliti di Giove; egli si limitò tuttavia a registrare i risultati delle proprie scoperte in disegni e calcoli rimasti manoscritti, così come fece per gli studi sulle orbite dei pianeti (che egli riteneva ellittiche) e per i suoi lavori matematici. Questi ultimi furono in parte pubblicati postumi dal suo allievo Walter Warner (1550-1636) nell'*Artis analiticae praxis* (1631). «Viète vi ha impedito di cogliere l'alloro della grande invenzione dell'algebra» gli scriveva il conte di Northumberland, ma a giudicare dalla *Praxis* appare chiaro che l'opera algebrica del francese era ben nota ad Hariot, che ad essa si ispirò in più luoghi, così come a Stifel, Stevin e agli algebristi italiani.

Nella *Praxis* Hariot introdusse il termine «aequatio canonica» per indicare una equazione della forma $f(a)=k$ (a incognita, k costante nota).

Egli usava il segno = introdotto da Recorde, i segni + e − e per indicare le potenze di una lettera ripeteva la lettera stessa. Ad Hariot si deve inoltre l'introduzione dei segni $>$ e $<$ (maggiore e minore) e l'idea di scrivere un'equazione come un'espressione uguagliata a 0. Considerando così un'equazione come un prodotto del tipo $(a-b)(a-c)...(a-m)$ uguagliato a 0, Hariot ne evidenziava le radici b,c,..,m che potevano anche essere numeri negativi, benchè egli spesso trascurasse questi ultimi, interessato com'era soprattutto all'interpretazione fisica dei suoi calcoli.

Nei manoscritti lasciati da Hariot si trova in realtà molto di più di quanto fu pubblicato da Warner nella *Praxis*; così Hariot sembra essere stato in possesso delle idee fondamentali della geometria analitica, come l'uso di coordinate rettangolari per determinare l'equazione di una curva. Nel 1603 era riuscito a trovare un metodo per calcolare l'area di un triangolo sferico,

problema che aveva inutilmente affaticato i geometri sin dall'antichità. Sembra infine che nei suoi calcoli Hariot lavorasse con un sistema binario (e con sistemi a base, 3, 4 e così via).

Hariot tuttavia si limitò a comunicare al suo gruppo di amici e allievi le proprie scoperte matematiche, così come i risultati dei suoi esperimenti fisici. «Voi mi insegnaste i diversi modi per osservare il peso nell'acqua e poco tempo dopo Ghetaldi lo fece uscire a stampa» gli scriveva nel 1610 William Lower (1507-?) rimproverandogli di aver mantenute manoscritte le sue misurazioni dei pesi specifici, anche più accurate di quelle pubblicate da Getaldić nell'*Archimedes promotus* (1603). Altrettanto inedita era rimasta la scoperta della legge di rifrazione, alla quale era pervenuto nel 1601 dopo diversi anni di ricerche sistematiche.

Per penetrare nei misteri della «casa della natura» come scriveva a Kepler, Hariot si ispirava all'atomismo fisico di Democrito e Epicuro e agli scritti di Bruno; analogamente a Galileo, egli era pervenuto ad una concezione atomistica degli indivisibili matematici: «Dal finito si genera l'infinito. L'infinito è composto dal finito. Il finito è scomponibile in indivisibili. Il finito è composto da indivisibili» (in Kargon [1966], 1983, 39-40), sono le sentenze che si leggono nel suo manoscritto *De infinitis*. Gli atomi compongono le linee matematiche, affermava Hariot, e «dunque sulla circonferenza di un cerchio un atomo si succede all'altro infinitamente, in maniera tale che infine si compone e si fa la circonferenza».

Queste stesse concezioni atomistiche lo avevano portato a spiegare la legge di rifrazione della luce, scriveva Hariot a Kepler. Questi gli obiettava invece la sua dottrina della trasparenza e della opacità dei corpi, rifiutandosi di seguire le ardite speculazioni filosofiche dell'inglese. «Mi meraviglio che le tue ipotesi ti soddisfino» commentava Hariot, aggiungendo: «Confesso che la mia opinione si basa alla dottrina di un vuoto... Ma le cose sono tali che non posso ancora filosofare liberamente».

Dal 1591 infatti Sir Raleigh e i suoi amici erano stati accusati di ateismo, Hariot denunciato come «stregone ed Epicureo» e un testimone affermò davanti ad una commissione istituita nel 1594 per indagare sulle accuse, di aver udito che «un certo Heryott di Sir Walter Ralegh nella sua casa ha messo in questione la divinità e l'intero corso delle scritture». La cosa per allora non ebbe seguito, anche se le voci crebbero e una sinistra fama di negromante e astrologo accompagnò in seguito la figura di Hariot.

Quando nel 1605 il conte di Northumberland fu arrestato e rinchiuso nella Torre di Londra in seguito al complotto dei papisti, anche Hariot subì per qualche tempo la sorte del suo protettore, benché mancasse qualunque prova a suo carico. Sebbene fosse dopo qualche tempo rimesso in libertà, non è difficile immaginare la cautela con cui egli da allora si espresse riguardo

alle sue opinioni filosofiche, per evitare «la miseria di un duro imprigionamento».

Anche la sua prematura fine per un cancro (nel 1621) fu vista dai contemporanei come un castigo divino per le sue empie teorie: «Egli non amava la vecchia storia della creazione del Mondo — si legge in una cronaca dell'epoca — diceva *ex nihilo nihil fit*. Ma un *nihilum* infine lo uccise; infatti sulla punta del suo naso spuntò una piccola chiazza rossa (molto piccola) che diventò sempre più grande e alfine lo uccise» (in Kargon [1966], 1983, 45).

L'eredità scientifica di Hariot fu raccolta da Warner, che verso il 1630 si legò al gruppo di filosofi naturali raccolto intorno a William Cavendish, duca di Newcastle. Tra questi vi erano Thomas Hobbes e John Pell (1611-1685), matematico e teologo che aveva compiuto i suoi studi al Trinity College di Cambridge. Giovanissimo aveva scritto una *Description and use of the quadrant* (Descrizione e uso del quadrante). Entrato in contatto con un gruppo di seguaci di Comenio, che cercavano di diffonderne le idee in Inghilterra, Pell aderì al loro invito di contribuire all'opera di propaganda scrivendo *An idea of mathematics* (Un'idea di matematica, pubblicato nel 1650) in cui Pell presentava come importante momento educativo per la diffusione del sapere matematico la costituzione di una biblioteca dotata non solo di tutta la letteratura matematica esistente, ma anche di una completa attrezzatura di strumenti da porre nelle mani dei giovani aspiranti matematici.

Su invito del Principe d'Orange, Pell insegnò dal 1646 in Olanda, presso l'università di Breda, incarico che lasciò nel 1652 allo scoppio della guerra fra Olanda e Inghilterra. Svolse poi per incarico di Cromwell un compito diplomatico in Svizzera, dove Pell entrò in contatto con Johann Rahn (1622-1676), che nel 1659 pubblicò una *Teutsche algebra* (Algebra tedesca) ispirata alle teorie di Viète e Descartes. Pell ne propose una traduzione inglese, che effettivamente curò e che uscì nel 1668, privata del nome dell'autore e con aggiunte dello stesso Pell.

Nelle sue osservazioni al libro di Rahn, Pell citava l'equazione $ax^2 + 1 = y^2$, che abbiamo visto oggetto della sfida lanciata da Fermat ai matematici suoi contemporanei. Pell non recava alcun contributo alla questione, anche se da Euler in poi (immotivatamente) a quel tipo di equazioni è stato dato il suo nome. Buon calcolatore, Pell era piuttosto vicino all'idea che della matematica avevano i «mathematical practitioners», la folta schiera di uomini che per quasi duecento anni fin verso la fine del Seicento costituì il fertile retroterra di tecnici, scrittori di manuali, calcolatori, agrimensori, fabbricanti di strumenti scientifici «che hanno praticamente la matematica sulla punta delle dita e sanno applicarla alle tante operazioni da loro svolte», come scriveva il fabbricante di bussole Robert Norman.

«A quel tempo la matematica da noi era assai poco considerata come disciplina accademica, bensì era ritenuta pertinente alle professioni e alle arti meccaniche, una faccenda da mercanti e navigatori, carpentieri, agrimensori o simili e forse utile anche a qualche compilatore londinese di almanacchi» affermava nel 1697 il medico e matematico John Wallis (1616-1703) ricordando la situazione inglese all'inizio del secolo. «Lo studio della matematica — continuava — era più coltivato a Londra che nelle università».

Del resto, John Dee non aveva forse scritto nella sua prefazione alla traduzione inglese degli *Elementi* euclidei curata da Billingsley, che la ragione principale che aveva spinto il Lord Mayor (sindaco) londinese ad affrontare la sua fatica era di fornire un aiuto ai «comuni artigiani» i quali, per «l'abilità e l'esperienza già acquisite, potranno (profittando di questi sussidi e di queste informazioni eccellenti) scoprire e immaginare opere nuove e cioè congegni e strumenti mai veduti in vista di applicazioni diverse utili alla comunità»? (in Hill [1965], 1976, 47).

Lo stesso Dee aveva compilato manuali e almanacchi per la gente di mare, messo la sua straordinaria collezione di libri a disposizione di Sir Walter Raleigh e William Drake, Hariot e Harklyut, lavorato a lungo come istruttore tecnico dei capitani della flotta della compagnia della Moscovia e infine aveva ripubblicato con note e aggiunte *The ground of artes* (Il fondamento delle arti), il popolarissimo manuale di aritmetica pratica di Robert Recorde, che tra il 1540 e il 1662 conobbe non meno di 26 riedizioni.

A Londra il centro degli studi scientifici era il Gresham College, un'istituzione creata allo scopo di promuovere l'istruzione degli adulti di estrazione popolare, dove il compito dei professori di matematica era di «spiegare l'uso degli strumenti comuni a beneficio della gente di mare». Leggere l'Euclide di Billingsley e andare ogni giovedì a sentire le lezioni di Briggs al Gresham College era la raccomandazione che nel 1601 faceva ai suoi compagni artigiani Richard More, un mastro carpentiere londinese.

Henry Briggs (1561-1630) — amico di Hariot e del conte di Northumberland, collaboratore di William Gilbert — era allora una delle figure più autorevoli degli ambienti matematici londinesi. Copernicano convinto e rigido presbiteriano in religione, Briggs aveva raccolto intorno a sé al Gresham College un gruppo di collaboratori e allievi interessati alle applicazioni pratiche della matematica, tra cui emergevano Edward Wright (1558-1615), il cartografo che aveva rivelato la grande utilità della proiezione di Mercatore nella pratica della gente di mare e che col libro *Certains errours in navigation detected* (Alcuni errori scoperti nella navigazione, 1598) «pose il sigillo alla supremazia degli inglesi nel trattamento teorico e pratico dell'arte della navigazione».

Nel 1619 sir H. Savile istituì ad Oxford le cattedre di geometria e

astronomia, per cercare di infondere anche nei tradizionali centri della cultura inglese lo spirito nuovo che si era venuto affermando nel Gresham College e Briggs fu chiamato a ricoprire la prima cattedra. Ma l'opposizione degli ambienti accademici e l'arroccamento nella tradizione vanificarono ben presto la speranza di Briggs che «Oxford farà passi avanti» in campo scientifico e, quando egli si ritirò, fu chiamato a succedergli un sostenitore dell'astronomia tolemaica, in seguito epurato (nel 1648) dai commissari inviati dal Parlamento alla fine della guerra civile.

Le vicende della matematica inglese del tempo furono infatti intimamente legate agli sviluppi della tormentata storia civile e religiosa dell'Inghilterra, attraversata da continue lotte tra anglicani e puritani, tra il re e il Parlamento, i nobili e le classi emergenti borghesi e mercantili, che sfociarono nella guerra civile. Così, mentre Oliver Cromwell raccomandava a suo figlio di «studiare matematica e cosmografia essendo queste discipline adatte a quelle mansioni pubbliche per cui un uomo è nato», non pochi esponenti della *gentry*, la piccola nobiltà terriera che da sempre aveva fornito tanti degli studenti delle università, erano ancora restii a mandare i figli a Oxford «temendo che fossero ivi contagiati con la pratica nera della matematica».

2. *La meravigliosa arte dei logaritmi.*

Nel 1614 Briggs ebbe notizia di una scoperta che sembrava rivoluzionare la pratica del calcolo: in quell'anno era stata pubblicata un'opera in latino dal titolo *Mirifici logarithmorum canonis descriptio* dello scozzese John Napier (1550-1617). Ricco possidente, Napier aveva studiato all'università di St. Andrews prima di intraprendere viaggi di studio nel Nord Europa, dove venne a conoscenza delle opere di Stevin, Stifel e degli scritti aritmetici di Diofanto. Ritornato in patria, Napier trascorse il resto della vita nel castello di Merchiston, nei pressi di Edimburgo, coltivando gli studi matematici e curando l'amministrazione delle sue proprietà.

Napier scrisse nel suo libro di esser stato originariamente indotto ad occuparsi di aritmetica dal desiderio di semplificare il compito dei calcolatori, che vedeva alle prese con operazioni come la moltiplicazione o la divisione di grandi numeri o le estrazioni di radici quadrate o cubiche, dove il grande dispendio di tempo spesso si accompagnava ad errori nei calcoli.

Un primo e più semplice artificio da lui inventato fu l'uso di «bastoncini» per effettuare facilmente le moltiplicazioni, di cui spiegava la tecnica d'uso nella *Rabdologia*, un volume che apparve a stampa nel 1617, quando l'autore aveva ottenuto una universale fama per il successo decretato ai suoi logaritmi.

Ognuno dei bastoncini di Napier era costituito da un parallelepipedo a base quadrata, ogni faccia essendo poi divisa in nove quadrati su cui venivano

scritti i multipli di un numero (compreso tra 0 e 9) posto nel primo quadrato per 1, 2, ..., 9. (v. figura). Sulle facce opposte di ogni bastoncino venivano posti numeri complementari rispetto a 9. I dieci bastoncini di Napier erano i seguenti:

3	1
/6	2
/9	3
1/2	4
1/5	5
1/8	6
2/1	7
2/4	8
2/7	9

I.	0, 1, 9, 8	II.	0, 2, 9, 7
III.	0, 3, 9, 6	IV.	0, 4, 9, 5
V.	1, 2, 8, 7	VI.	1, 3, 8, 6
VII.	1, 4, 8, 5	VIII.	2, 3, 7, 6
IX.	2, 4, 7, 5	X.	3, 4, 6, 5

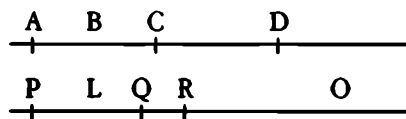
Scrivendo i multipli nella maniera indicata in figura e sommando le cifre che stanno nello stesso parallelogramma, Napier poteva facilmente ottenere il risultato della moltiplicazione di un numero qualunque per un numero compreso fra 1 e 9. Se il moltiplicatore era un numero composto da più cifre, come per esempio 8764 e il moltiplicando un numero come 6179, il risultato si otteneva facilmente sommando nella maniera indicata i prodotti di quest'ultimo numero rispettivamente per 4, 6, 7, 8.

6	1	7	9	1
1/2	/2	1/4	1/8	2
1/8	/3	2/1	2/7	3
2/4	/4	2/8	3/6	4
3/0	/5	3/5	4/5	5
3/6	/6	4/2	5/4	6
4/2	/7	4/9	6/3	7
4/8	/8	5/6	7/2	8
5/4	/9	6/3	8/1	9

```
      2 4 7 1 6
    3 7 0 7 4
  4 3 2 5 3
4 9 4 3 2
---------------
5 4 1 5 2 7 5 6
```

I bastoncini di Napier godettero di un'enorme popolarità e divennero ben presto di uso comune. Napier aveva sì inventato un artificio che permetteva di ridurre le moltiplicazioni a più semplici somme; ma i suoi bastoncini, sufficienti per le più usuali esigenze della vita pratica, si rivelavano largamente inadeguati per i più raffinati e complessi calcoli richiesti nell'astronomia o nella navigazione.

Napier si affaticò intorno alla soluzione di questo problema per circa vent'anni, prima di pervenire all'idea dei logaritmi. Sembra che egli prendesse le mosse dal confronto fra una successione aritmetica e la corrispondente successione geometrica, un'osservazione che si trova anche in Stifel, ma non ulteriormente sviluppata.

Nella *Descriptio* Napier si avvaleva di un linguaggio geometrico suggestivo e immediatamente intuitivo. Considerava una retta su cui, a partire da un punto A, si muoveva un punto B con velocità costante: «fluat ergo primo momento B ab A in C, secundo momento a C in D etc». Prendeva poi su

una seconda retta un punto L muoventesi contemporaneamente (*synchronus motus*) a B, ma con velocità decrescente in progressione geometrica, in modo che nel primo istante percorresse 1/m del cammino totale, nel secondo ancora 1/m del cammino restante (cioè $(1-1/m)^2$ del cammino totale e così via).

Napier chiamava i segmenti sulla prima retta *logaritmi* (da *logos* = rapporto e *arithmos* = numero) dei corrispondenti segmenti sulla seconda. Si trattava ora di tradurre questa idea geometrica in termini aritmetici: lasciandosi guidare da questioni di utilità pratica, Napier decise di attribuire al *sinus totus* (= sen 90°) il valore 0 del logaritmo. Infatti, «erat quidem initio liberum cuilibet sinui aut quantitati nullum seu 0 pro logarithmo attribuisse», ciascuno all'inizio è libero di attribuire il valore 0 del logaritmo alla quantità (o seno) che più gli piace. Napier giustificava la sua scelta con la frequenza con cui capita nei calcoli di moltiplicare o dividere per sen90°, il che si sarebbe tradotto semplicemente nel dover aggiungere o togliere 0 nei logaritmi.

Nella *Descriptio* egli presentava così una tavola dei logaritmi delle funzioni trigonometriche senα, cosα, tgα calcolata per angoli α ad intervalli di 1' tra 0° e 90°. Nella *Admonitio* al lettore Napier chiedeva apertamente un giudizio dei dotti sulla sua tavola di logaritmi, prima di pubblicare il metodo

che gli aveva permesso di costruirla. «Nihil in ortu perfectum», niente all'inizio è completo, si giustificava lord Merchiston per il suo riserbo.

L'accoglienza della *Descriptio* fu entusiastica: «Napier, il lord di Merchiston, ha posto la mia testa e le mie mani al lavoro con i suoi nuovi e meravigliosi logaritmi» scriveva ammirato Briggs. «Non ho mai visto un libro che mi sia piaciuto di più e che mi abbia più meravigliato». Briggs cominciò immediatamente a lavorare coi logaritmi e a insegnarli nelle sue lezioni a Gresham House, convincendo inoltre Edward Wright a tradurre dal latino in inglese l'opera di Napier. Il volume apparve nel 1616, un anno dopo la morte del traduttore, completato da una *Instrumental Table* redatta da Briggs e significativamente dedicato alla Compagnia delle Indie Orientali, per la quale Wright lavorava come «mathematical practitioner».

Il «canone dei logaritmi» si diffuse rapidamente e già nel 1616 l'agrimensore Aaron Rathborne (1572-1618) affermava nel suo libro *The Surveyor* (Il sovraintendente) che le tavole dei logaritmi erano ormai di uso comune presso i calcolatori professionali.

Briggs visitò il Lord di Merchiston una prima volta nel 1615 e poi ancora l'anno successivo. Nel corso dei suoi incontri con Napier egli propose di scegliere come logaritmo di 10 il numero -1, che Napier corresse nella scelta di 1, in modo che per numeri crescenti anche il valore del logaritmo fosse crescente. Napier aveva già considerato questa possibilità anche se poi nella costruzione delle sue tavole aveva optato per una scelta diversa, come appare nella *Mirifici logarithmorum canonis constructio*, l'opera apparsa postuma nel 1619, dove Napier esponeva la via da lui seguita per costruire le tavole pubblicate nella *Descriptio*.

Qui Napier prendeva ancora le mosse dal modello geometrico dei due punti muoventesi di moto sincrono che abbiamo visto in precedenza, fissando come lunghezza del segmento PO il numero 10^7 e come valore di m nella progressione geometrica $m=10^7$. In tal modo egli aveva una progressione geometrica data dalle successive potenze intere di $(1-10^{-7})$, i cui valori sono ancora molto prossimi a 1 e rendono possibile un'accurata interpolazione. Egli attribuiva inoltre al punto P la velocità iniziale di 10^7, in modo quindi che per un numero $N=10^7\ (1-10^{-7})^x$, x rappresenta il logaritmo «neperiano» di N.

Come ha mostrato Whiteside (1961, 219) per costruire concretamente il suo «canone logaritmico» Napier calcolò dapprima i valori $10^7(1-10^{-7})^k$, $k=0,1,2,...100$, trovando per $k=100$ il valore 9999900,0004950, poi i 51 numeri $10^7(1-10^{-5})^h$, con $h=0,1,2,...,50$ e infine i 21.69 numeri $10^7(1-5.10^{-4})^i.(1-10^{-2})^j$ con $i=0,1,2,..,20$ e $j=0,1,2,...,68$ scoprendo che per $i=20$ e $j=68$ il numero ottenuto è di poco minore della metà di 10^7. Facendo la media aritmetica per ogni coppia di numeri trovata, Napier

otteneva una tabulazione dei logaritmi per l'intervallo $\left[\frac{1}{2}\cdot 10^7,\ 10^7\right]$, che poi in maniera analoga estendeva alla rimanente metà dell'intervallo $[0,10^7]$. Infine calcolava i logaritmi di 10^7 sinα, prendendo come s'è detto α ad intervalli di 1' tra 0° e 90°.

Benché la corrispondenza tra numeri e loro logaritmi imponga con suggestiva evidenza ai nostri occhi il concetto di funzione, non c'è traccia esplicita in Napier di un tale concetto e nemmeno dell'idea di «base» dei logaritmi; inoltre c'è qualche differenza tra i logaritmi così introdotti da Napier e gli usuali logaritmi naturali. Infatti, se per esempio si considerano due numeri $N_1 = 10^7(1-10^{-7})^x$ e $N_2 = 10^7(1-10^{-7})^y$, la somma dei logaritmi $x+y$ darà il logaritmo di $N_1 \cdot N_2/10^7$, il che implica tuttavia un semplice spostamento della virgola. Ciò, in qualche modo, era presente allo stesso Napier dato che egli osservava che se due numeri sono in rapporto di 10 a 1, la loro differenza in logaritmi è data da 23025842,34 che, a meno della posizione della virgola, è il logaritmo naturale di 10. Infatti $(1-10^{-7})^{10^7}$ è una buona approssimazione di $1/e = \lim_{n\to\infty}(1-1/n)^n$, dove e è la base dei cosiddetti logaritmi naturali, introdotti da Euler in analisi. Questa osservazione spiega inoltre perché i logaritmi di Napier fossero decrescenti per valori crescenti del numero di cui si cercava il logaritmo.

L'idea geometrica, che fu alla base dei logaritmi di Napier, ci suggerisce infine in maniera naturale la relazione tra il concetto di logaritmo e il problema della quadratura dell'iperbole, cosa che sfuggì per quasi 50 anni ai matematici, interessati inizialmente — come Napier — alla grande efficacia algoritmica dell'invenzione e dunque incapaci di coglierne le profonde connessioni con un problema che tradizionalmente sembrava doversi affrontare con tecniche puramente geometriche.

Dopo i primi incontri con Napier, Briggs continuò a sviluppare le proprie ricerche sui logaritmi secondo le idee discusse con il lord di Merchiston. Per portare in porto i suoi calcoli Briggs aveva elaborato un interessante metodo di interpolazione numerica, fondato sulla successiva estrazione di radici quadrate, in altri termini, sull'inserzione successiva di medie geometriche tra 1 e N (il numero di cui si vuole il logaritmo). Nel 1617 compariva a stampa la *Logarithmorum chilias prima*, dove Briggs presentava tavole dei logaritmi per i primi 1000 numeri. Ad essa faceva seguito qualche anno più tardi l'*Arithmetica logarithmica* (1624) dello stesso autore, con tavole dei logaritmi (calcolati con 24 cifre) per i numeri da 1 a 20.000 e da 90.000 a 100.000. Le ricerche di Briggs erano principalmente motivate dalle applicazioni pratiche dell'invenzione di Napier. Non mancano tuttavia nelle opere di Briggs importanti risvolti teorici, come lo sviluppo in serie binomiale di

$(1+\alpha)^{1/2}$, $|\alpha| < 1$ e le sue considerazioni sull'interpolazione, che lasciano implicitamente intravedere l'uso della formula di interpolazione di Newton-Gauss.

Fin dalla loro comparsa, i logaritmi avevano trovato applicazione, oltre che nei calcoli pratici, in trigonometria e geometria. Nell'edizione inglese della *Descriptio* compariva in un'appendice anonima, ma molto probabilmente opera di Oughtred, una breve esposizione dell'uso dei logaritmi nella risoluzione dei triangoli.

Elemento di spicco nel gruppo dei matematici del Gresham College, William Oughtred (1575-1660) aveva lavorato alla progettazione di diversi strumenti matematici, compreso il suo «horizontal instrument» che funzionava come una sorta di astrolabio. Nel 1631 pubblicò la *Clavis mathematica*, un'opera di aritmetica e algebra ispirata ai lavori dei più recenti autori continentali, che conobbe diverse riedizioni ed esercitò un'enorme influenza sulla formazione dei giovani matematici inglesi. Nonostante la fantasia nell'inventare nuovi simboli matematici (di cui il solo per la moltiplicazione è rimasto in uso) Oughtred non fu certo un matematico di grande originalità, né grande interesse teorico rivestono i suoi commenti al II e X libro degli *Elementi* di Euclide o una sua ponderosa *Trigonometria*. Egli tuttavia rappresentò a Londra la continuità della tradizione matematica del Gresham College, di fronte alla desolante situazione offerta dalle università. Tra coloro che si dichiararono suoi allievi ci fu John Wallis, forse il più brillante e capace ingegno matematico dell'Inghilterra di quel secolo, secondo al solo Newton.

3. *L'aritmetica degli infiniti.*

Come Pell e molti matematici inglesi di quell'epoca, Wallis aveva compiuto gli studi universitari in teologia a Cambridge. Avendo deciso di perfezionare le sue scarse conoscenze scientifiche, nel 1645 si trasferì a Londra, dove entrò in contatto con William Oughtred, Lord William Brouncker, Heinrich Oldenburg (1615?-1677), il *virtuoso* Kenelm Digby e il gruppo di scienziati e matematici che periodicamente si riuniva al Gresham College e che quindici anni più tardi, quando gli uomini di scienza furono espulsi da Oxford, diede vita prima a una società scientifica tra i partecipanti e poi, con decreto di Carlo II, alla Royal Society.

Studioso di logica, di fisica, di anatomia, segretario dell'assemblea di Westminster, Wallis si era segnalato durante la guerra civile per la sua abilità nello sciogliere criptogrammi e leggere messaggi in codice cifrato. Costruì egli stesso, per l'esercito puritano, un alfabeto cifrato «composto di circa 700 figure numeriche con vari altri caratteri ad esse mescolati». Alla fine della

guerra i commissari designati dal Parlamento lo mandarono a Oxford a ricoprire la cattedra saviliana di geometria che era stata di Briggs.

«La matematica che prima era stata un piacevole diversivo, ora divenne il mio studio principale» affermò Wallis nel 1649 quando fu designato a Oxford. A quell'epoca risalgono infatti i suoi studi sui recenti risultati dei geometri italiani, che egli così raccontava nelle prime pagine dell'*Arithmetica infinitorum* (1655), l'opera dedicata a Oughtred, e alla quale è maggiormente legata la sua fama matematica: «Alla fine del 1650 — scrive Wallis — mi capitarono tra le mani gli scritti matematici di Torricelli (che io, occupato da altre cose, aprii solo l'anno seguente 1651): tra le cose che egli esponeva c'era la *geometria indivisibilium* di Cavalieri. Non avevo sottomano il libro di Cavalieri, né potei trovarlo dal libraio, ma il suo metodo, come lo espone Torricelli, mi piacque moltissimo poiché ero arrivato a pensare qualcosa del genere fin da quando avevo cominciato a dedicarmi alla matematica».

Wallis si impadronì rapidamente del metodo degli indivisibili, che come Cavalieri e Torricelli applicò con successo a problemi di quadratura e cubatura. Ma mentre i geometri italiani si mantennero fedeli al classico purismo geometrico del modello archimedeo, Wallis, erede consapevole delle tecniche algoritmiche di Briggs e dei «practitioners» e sorretto da una formidabile intuizione matematica e una grande abilità di calcolo, si spinse decisamente sul terreno dell'integrazione numerica, sviluppando una audace «aritmetica degli infiniti» annunciata già nel titolo della sua opera. Né d'altra parte Wallis era preoccupato di divinare il «vero» metodo degli Antichi, l'irrisolta questione che a lungo aveva tormentato i geometri rinascimentali. Gli Antichi e Archimede in particolare sembrano a bella posta aver cancellato così bene le tracce del loro metodo di scoperta che è molto più utile e fecondo per il progresso della scienza abbandonare quei tentativi di «divinazione» e dedicarsi liberamente alla ricerca di nuovi metodi: questa è la sbrigativa opinione di Wallis.

Egli comincia così ad osservare che valgono le seguenti relazioni numeriche tra la somma dei primi n quadrati (a partire da 0) e n+1 volte n^2:

$$\frac{0+1+4+\ldots+n^2}{n^2+n^2+\ldots+n^2}=\frac{1}{3}+\frac{1}{6n}$$

oppure tra la somma dei primi n cubi e n+1 volte n^3:

$$\frac{0+1+8+..+n^3}{n^3+n^3+..+n^3}=\frac{1}{4}+\frac{4}{n}$$

e analogamente per le 4^e, 5^e, 6^e potenze. «Facto enim experimento» per i primi numeri interi, Wallis generalizza immediatamente il risultato a una potenza intera qualunque con una sorta di «modus inductionis» enunciando la proposizione che in termini moderni si scrive:

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\sum^{n} i^m}{\sum n^m} = \frac{1}{m+1}$$

giacchè la differenza tra il primo e il secondo membro «tandem evadat quavis assignabili minor; adeoque in infinitum evanescet», riesce sempre minore di una qualunque quantità prefissata e dunque continuando fino all'infinito si annulla. Wallis non produce una dimostrazione, ma si limita ad affermare che la cosa è vera, «ut patet», com'è chiaro.

Egli è ora in grado di trovare la quadratura delle infinite parabole della forma $y = x^n$ (n intero), cioè calcolare (in termini moderni) l'integrale

$$\int_0^1 x^n dx = \frac{1}{n+1}$$

un risultato già noto a Cavalieri, Fermat, Torricelli e Roberval.

Con un analogo ragionamento aritmetico, facendo ancora ricorso al suo preferito «modus inductionis», che potrebbe esser definito come un uso audace e spregiudicato dell'analogia, Wallis mostra che la relazione

$$\lim_{n\to\infty} \frac{\sum i^m}{\sum n^m} = \frac{1}{m+1}$$

vale anche per m razionale e addirittura per qualunque valore irrazionale: «Sin index supponatur irrationalis, puta $\sqrt{3}$, erit ratio ut 1 ad $1+\sqrt{3}$ etc», scrive infatti Wallis. Il che gli permette di quadrare archi delle infinite curve $y = x^{m/n}$.

Quando $n = -1$, il quoziente $1/(n+1)$ diventa $1/0$, «quotiens erit ∞ vel infinitus» e il metodo non funziona. Paradossali sono le conclusioni che Wallis trae dalla considerazione dei valori negativi di n; basandosi infatti sull'osservazione che al diminuire di n il valore del rapporto $1/(n+1)$ aumenta, egli conclude che i numeri negativi sono «plus quam infinitum», maggiori dell'infinito. Infatti

$$\frac{1}{4} < \frac{1}{3} < \frac{1}{2} < \frac{1}{1} < \frac{1}{0} < \frac{1}{-1} \text{ ecc.}$$

Su analoghe tecniche aritmetiche si basava il suo metodo per trovare la quadratura del cerchio. L'area del quadrante di cerchio di raggio 1 è data infatti dall'integrale $\int_0^1 (1-x^2)^{1/2}dx$. Dunque il rapporto tra il quadrato del raggio e l'area del quadrante è dato dalla proporzione:

$$4:\pi = 1:\int_0^1 (1-x^2)^{1/2}dx.$$

Per calcolare l'integrale che compare al secondo membro, Wallis cominciò ad osservare che esso era ottenibile come caso particolare ($n=\frac{1}{2}$, $p=\frac{1}{2}$) dal più generale (Whiteside 1961, 237):

$$f(p,n) = 1:\int_0^1 (1-x^{1/p})^n dx$$

e che, per valori interi di p e n, era

$$f(p,n) = \binom{n+p}{p} = \frac{(n+p)!}{p!\ n!} = \frac{(n+p)\ (n+p-1)\dots\ (n+1)}{1.2.3.\ \dots p}$$

Egli costruì allora una tabella per i primi valori interi di n e p, e con una ingegnosa tecnica di interpolazione, che si basava sull'uso del triangolo di Tartaglia dei coefficienti binomiali e sulla simmetria della tabella ottenuta rispetto a n e p, egli concluse col solito metodo di induzione (incompleta) che per $n=\frac{1}{2}$ e $p=\frac{1}{2}$ si aveva il prodotto infinito

$$\frac{4}{\pi} = \frac{3.3.5.5.7.7\dots}{2.4.4.6.6.8\dots}$$

che è la celebre formula di Wallis per esprimere π come quoziente di prodotti di infiniti fattori e certo il risultato più significativo dell'*Arithmetica infinitorum*.

Wallis, esitante di fronte al risultato ottenuto, scrive di averlo sottoposto a Lord Brouncker; questi trovò per lo stesso prodotto infinito l'espressione in frazione continua

$$1 + \cfrac{1}{2 + \cfrac{9}{2 + \cfrac{25}{2 + \cfrac{49}{2 + \dots}}}}$$

che Wallis inserì nel proprio volume, senza rivelare la via seguita da Brouncker per ottenerla.

Frazioni continue analoghe a quella trovata dal futuro presidente della Royal Society erano già comparse nella storia della matematica; certamente tuttavia erano rimaste sconosciute ai due matematici inglesi. Allo stesso concetto era infatti pervenuto Daniel Schwenter (1585-1636), professore ad Altdorf, nella sua *Geometria pratica* (1618) e prima ancora Pietro Antonio Cataldi (1552-1626), forse l'ultimo originale esponente della scuola degli algebristi bolognesi del Rinascimento.

Lettore di matematica allo Studio di Bologna dal 1584, Cataldi fu autore di numerosi opuscoli e trattati d'algebra e di geometria. Nell'*Algebra discorsiva numerale, et lineare* Cataldi costruiva geometricamente le equazioni di 2° grado per dimostrare come «nelle operazioni algebratiche in vece dell'operare con i numeri, si adoprano le linee», cosa che fece incautamente scrivere allo storico G. Libri «qui c'è, come si vede, la geometria analitica». A questo fecero seguito i manoscritti sulla *Nova algebra proportionale* e sull'*Algebra applicata* (1622) e altri di carattere didattico, tra cui gli *Elementi delle quantità irrationali* (1620).

Le quantità irrazionali erano state argomento di un precedente opuscolo di Cataldi che qui ci interessa, il *Trattato del modo brevissimo di trovare la radice quadra delli numeri* (1613). In quest'operetta il matematico bolognese insegnava le «regole da approssimarsi di continua al vero nelle radici de' numeri non quadrati, con le cause et inventioni loro».

Si trattava di un problema antico. Tradizionalmente per le radici quadrate di un numero non quadrato $N = a^2 + r$ erano note le approssimazioni empiriche

$$a_1 = a + (N - a^2)/2a$$
$$a_2 = a + (N - a^2)/2a + 1$$

la prima corrispondente alla media aritmetica fra a e N/a, la seconda ottenuta col classico metodo della doppia falsa posizione.

Nella *Practica arithmeticae generalis* Cardano aveva mostrato come estrarre la radice quadrata approssimata di un numero, argomento che Tartaglia ripropose nella sfida matematica con Ferrari. Le risposte date ai quesiti di Tartaglia non mancarono di vivacizzare una già accesa polemica e il matematico bresciano nel *General trattato* puntigliosamente si dilungava sugli «errorazzi» compiuti a suo dire da Ferrari. Dopo aver menzionato i contributi di Michael Stifel, che nelle «estrattioni delle radici rationali et discrete si è mostrato molto eccellente», lo stesso Tartaglia presentava una «regola generale da sapere in tali estrattioni di radici in infinito più oltra procedere» e insegnava inoltre come determinare i coefficienti delle potenze

dei binomi (il cosiddetto «triangolo di Tartaglia», noto peraltro anche a Stifel). Il «procedere in infinito» di Tartaglia era più dichiarato che realmente esibito, faceva notare Bombelli, che nel capitolo della sua *Algebra* dedicato alle radici quadrate dimostra la prima delle formule di approssimazione sopra scritte con l'esempio paradigmatico di $\sqrt{13}$ e aggiunge che ripetendo il ragionamento «si approssimarà come l'huomo vorrà». È questo il compito che concretamente portò a termine Cataldi.

Chiamate «scarse» o «eccedenti» le radici approssimate per difetto o per eccesso, Cataldi mostra che la radice quadrata di un numero non quadrato è irrazionale («ne intero, et rotto, cioè misto alcuno») e, con esempi numerici, come proseguire nell'approssimazione a partire dalle due formule sopra ricordate ottenendo valori «più propinqui quanto ci piacesse» a $\sqrt{N}$. Così per esempio

$$\sqrt{18} = 4 + \frac{2}{8 + \frac{2}{8 + \frac{2}{8 + \dots}}}$$

frazione continua di cui Cataldi insegnò anche a determinare il «rotto» (la ridotta) di ordine n.

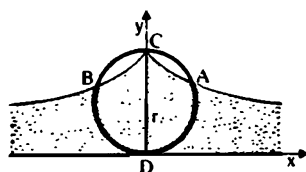
Nello stesso *Trattato* egli aveva anche mostrato come approssimare la radice con una somma di un numero arbitrario di termini (una serie infinita) di cui dava la legge di formazione. Egli confrontava poi i due metodi avendo in vista la rapidità della convergenza a $\sqrt{N}$.

«Si può ben dire — come ha osservato Bortolotti (1947, 93) — che lo studio di serie infinite e la scoperta della frazione continua, hanno aperto un gran varco per l'infinito nel campo numerico, prima chiuso a tali indagini». Ma occorre aggiungere che i matematici si avventurarono per quel «varco» non tanto sulle orme di Cataldi, quanto seguendo la via che Wallis aveva aperto con la sua *Arithmetica infinitorum*, l'opera che verso la metà del secolo rese familiare il calcolo con algoritmi infiniti.

4. *La «vera» quadratura del cerchio e dell'iperbole.*

Nella sua opera Wallis aveva insegnato a calcolare le coordinate di alcuni punti di una linea, di cui allora invano si cercò di determinare l'equazione e che Huygens per comodità chiamò semplicemente *linea di Wallis*. La sua equazione fu trovata qualche decennio più tardi da Euler ricorrendo alla sua funzione $y = \Gamma(x)$; ma il fitto carteggio allora intercorso tra Huygens e Wallis su questa curva ci offre un'ulteriore testimonianza di quanto si fosse

arricchito il patrimonio di curve, al cui studio i matematici dedicavano le loro energie, saggiando i nuovi metodi trovati.

Nel 1659 Wallis dava alle stampe i risultati sulla cicloide, originati dall'infelice sfida di Pascal (vol. I, cap. IX). Egli mostrava come con le tecniche della sua *Anthmetica* si potesse trovare la quadratura della cicloide e del solido di rotazione da essa generato, come domandava Pascal; inoltre, rispondendo ad una richiesta di Huygens, mostrava ancora con procedimenti algoritmici infiniti che la superficie compresa tra la cissoide di Diocle e il suo asintoto era tre volte quella del cerchio generatore della curva.

Come appendice al volume di Wallis comparivano le ricerche sulla cicloide di un giovane docente del Gresham College, Christoph Wren (1632-1723), dal 1661 professore saviliano di geometria a Oxford. Wren insegnava a determinare la tangente alla curva, cosa che abbiamo visto essere già ampiamente nota ai matematici francesi, ma ancora inedita, e inoltre a rettificare l'arco di curva con un procedimento che sembrava piuttosto ispirato alle tecniche di Torricelli.

Rettificazioni e quadrature di curve nuove (o antiche, come il cerchio o l'iperbole) erano questioni di grande attualità e se l'opera di Wallis fu forse quella che allora ebbe maggior fortuna, non meno importanti e discusse furono quelle di Gregorio di St. Vincent (1584-1667) e Pietro Mengoli (1626-1686), James Gregory (1638-1675) e Nicolaus Kaufmann (?-1687) noto col nome latinizzato di Mercator, che dall'originario Holstein si trasferì a Londra, dove divenne membro della Royal Society.

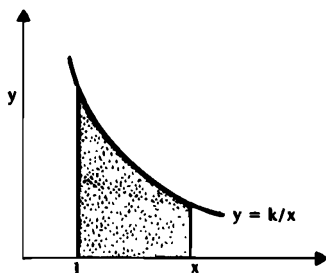
Gregorio, un gesuita di Bruges che aveva studiato al Collegio Romano con Clavio e dal 1621 insegnava matematica a Lovanio, aveva ultimato nel 1625 un trattato in cui pensava di aver risolto il celebre problema della quadratura del cerchio e chiese al Generale dei gesuiti Muzio Vitelleschi (1563-1645) l'autorizzazione alla pubblicazione. Incerto sul da farsi e non abbastanza addentro alle cose matematiche, Vitelleschi disse a Gregorio di rivolgersi a Cristoph Grienberger (1564-1636), il gesuita che era succeduto a Clavio nell'insegnamento della matematica al Collegio Romano. Gregorio si recò anche a Roma, ma dopo due anni di inutili discussioni con Grienberger ritornò a Lovanio senza alcun risultato. Dopo una tormentata vicenda

(Gregorio fu a Praga e Vienna e il suo manoscritto andò in parte distrutto e dovette essere riscritto) il *Problema austriacum plus ultra quadratura circuli* di Gregorio fu dato finalmente alle stampe nel 1647, in un imponente volume di 1250 pagine in folio.

Il «problema austriacum» — come Gregorio chiamò l'antico problema della quadratura del cerchio in onore dell'arciduca austriaco Leopoldo Guglielmo, governatore dei paesi Bassi dedicando a lui la sua opera — attirò immediatamente l'attenzione dei matematici, lasciando in ombra numerosi altri risultati ottenuti dal gesuita, come l'introduzione di metodi di trasformazione delle figure piane (da Gregorio detti «ducere planum in planum», «ducere planum in se» e «ducere planum in se ipsum subalterne», che ai contemporanei ricordarono gli indivisibili di Cavalieri) e la dimostrazione di proprietà dell'iperbole, della parabola e della spirale d'Archimede.

Mersenne parlò apertamente di plagio ai danni di Fra Bonaventura e contestò la pretesa di Gregorio di aver quadrato il cerchio, e con lui concordò Huygens. Le considerazioni di Gregorio suggerivano inoltre a Mersenne il seguente problema, che egli sfidava il gesuita a risolvere: «Datis tribus quibuscumque magnitudinibus, rationalibus vel irrationalibus, datisque duarum ex illis logarithmis, tertiae logarithmum geometrice invenire», date tre grandezze razionali o irrazionali e i logaritmi di due, trovare geometricamente il logaritmo della terza. Un problema che si trova risolto in un'appendice del gesuita A. de Sarasa (1618-1667) al volume postumo di Gregorio *Opus geometricum ad mesolabium*.

La risoluzione del problema poneva per la prima volta in evidenza ciò che matematici come Huygens o Newton avevano già scoperto, la natura logaritmica dell'area del segmento di iperbole, che appare immediatamente chiara se si pensa che per un'iperbole equilatera $xy = k$ è (in simboli moderni):

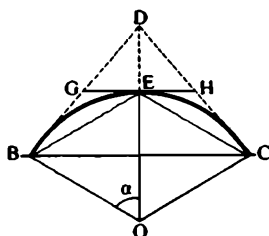
$$k \log x = \int_1^x k/x \, dx$$

A concezioni analoghe era pervenuto anche Mengoli, che nelle *Novae quadraturae arithmeticae*, pubblicate a Bologna nel 1650, si ispirava al modello geometrico fornito dall'iperbole $xy = 1$ nel tentativo di trovare condizioni di convergenza per l'integrale $\int_1^x 1/x \, dx$. Nel corso di queste ricerche Mengoli giunse a stabilire che la serie armonica $\sum_1^\infty 1/n$ è divergente, così come la serie che si ottiene sopprimendo un certo numero dei suoi primi termini e quindi era divergente anche la serie i cui termini sono i reciproci di quelli di una progressione aritmetica di ragione maggiore di uno.

Mengoli, che aveva studiato a Bologna e che fu lettore di matematica in quello Studio fino al 1686, nelle sue ricerche si richiamava alla tradizione geometrica di Cavalieri, coniugata con la costante ricerca di una traduzione in termini analitici (ossia algoritmici) dei problemi e delle loro soluzioni. Così in un suo scritto *Circolo* (1560) ritrovava indipendentemente da Wallis l'espressione di $\pi/4$ in prodotto di infiniti fattori e nella *Geometria speciosa* (1659) presentava una originale trattazione dei logaritmi, dando anche alcuni sviluppi in serie ad essi associati.

Mengoli partiva dalla considerazione di due successioni, che egli chiamò rispettivamente «hyperlogarithmi» e «hypologarithmi» e chiamò logaritmo la quantità (definita con un implicito procedimento di limite) che è maggiore di tutti i secondi e minore di tutti i primi. In questo modo egli ottenne immediatamente la proprietà fondamentale $\log m - \log n = \log m/n$ e inoltre una espressione in serie infinita di $\log m/n$ che per $m = 2$ e $n = 1$ dà la celebre serie

$$\log 2 = 1 - \frac{1}{2} + \frac{1}{3} - \frac{1}{4} + \ldots$$

che nello stesso periodo era stata trovata anche da Lord Brouncker ma pubblicata solo nel 1668 nell'opuscolo *The squaring of the hyperbola by an infinite series of rational numbers* (La quadratura dell'iperbole mediante una serie infinita di numeri razionali), e che rivedremo ritrovata da diversi autori, da Mercator a Leibniz.

La disputa sulla quadratura del cerchio sollevata dall'opera di Gregorio di St. Vincent, che aveva portato al fiorire di ricerche su questo classico problema verso la metà del Seicento, riprendeva con rinnovato accanimento in seguito alla pubblicazione della *Vera circuli et hyperbolae quadratura* di James Gregory, pubblicata a Padova nel 1667. Il giovane scozzese aveva studiato in quella città dal 1664, seguendo le lezioni di Stefano degli Angeli (cfr. cap. V di questo volume) e familiarizzandosi quindi con i metodi degli indivisibili di Cavalieri e Torricelli. L'anno seguente la *Quadratura* di Gregory veniva ristampata come appendice all'altra sua opera *Geometriae pars universalis*.

Il punto di partenza di Gregory era la costruzione di una coppia di successioni di poligoni iscritti e circoscritti ad un settore circolare di centro O. Il primo poligono iscritto era il triangolo OBC. Conducendo le tangenti in B e C al cerchio, egli otteneva anche il primo poligono circoscritto OBCD. Il passo successivo era la considerazione della tangente al cerchio parallela a CB, che portava ai due poligoni OBEC (iscritto) e OBGHC (circoscritto). Ripetendo questa procedura egli otteneva una coppia di successioni di poligoni «convergenti» (termine da lui introdotto), la cui «terminatio» era appunto l'area del dato settore circolare.

Per determinare il limite (la «terminatio») di quelle successioni, la cui esistenza ci appare agli occhi con immediata evidenza, occorre trovare una funzione (una «quantitas», dice Gregory) che permetta di determinare tutte le successive coppie di poligoni iscritti I_n e circoscritti C_n a partire dalla prima coppia I_0, C_0. Ma, ed è questo il punto di maggior rilevanza teorica della *Vera quadratura*, Gregory afferma che è impossibile trovare tutti i termini delle due successioni con la stessa espressione «analitica» (cioè una combinazione *finita* delle cinque operazioni «analitiche» +, −, ×, :, estrazione di radice quadrata).

Gregory non riesce a dare una dimostrazione rigorosa del suo asserto, come gli obiettò immediatamente Huygens, ma cerca di renderlo plausibile con esempi, in modo da concludere che non può esistere una «terminatio» esprimibile analiticamente, cioè che non si può quadrare il cerchio in maniera «analitica».

Ciò che Gregory tenta di dimostrare — e che lascia perplessi i matematici del tempo — non è la natura trascendente del numero π, cioè il fatto che π non è radice di alcun polinomio $P_n(x)$ a coefficienti razionali, dimostrato solo nel 1882 da Friedrich Lindemann (1852-1936) sulla scorta dell'analoga dimostrazione data da Hermite per il numero *e* (vol. II, cap. XXXVIII).

La sostanza del ragionamento di Gregory sembra essere infatti che la quadratura del cerchio non è problema risolvibile con riga e compasso (cioè π è un numero irrazionale), anche se l'allusione a estrazioni di radici di indice

qualunque da parte di Gregory sembra suggerire una maggiore generalità del suo enunciato.

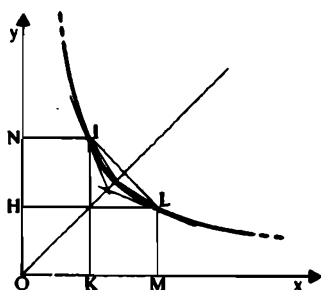
Gregory inviò una copia del suo scritto a Christiaan Huygens (1629-1695), il figlio di Costantin, il diplomatico olandese che abbiamo incontrato tra gli amici e corrispondenti di Descartes. Il giovane Christiaan si era ben presto segnalato per le sue grandi doti matematiche, diventando uno degli esponenti più stimati del gruppo di matematici cartesiani, che in Olanda si riuniva attorno a van Schooten.

Verso la metà degli anni '50 aveva cominciato a pubblicare alcuni suoi lavori, tra cui il libro *De circuli magnitudine inventa* (1654) e, nel 1659, la scoperta dell'anello di Saturno, compiuta qualche tempo prima. A quello stesso periodo risale l'invenzione dell'orologio a pendolo, che insieme alle scoperte astronomiche, fa di Huygens, all'inizio degli anni Sessanta, un uomo celebre.

Dal 1663 Huygens, che aveva già visitato la capitale francese e preso contatto con i matematici parigini, risiede stabilmente a Parigi. Colbert, il potente ministro del Re Sole lo invita, *primus inter pares*, a organizzare l'Académie des Sciences, fondata nel 1666 sull'esempio della Royal Society, di cui Huygens è membro fin dall'epoca della sua visita a Londra.

In quegli anni Huygens era universalmente ritenuto il matematico e fisico più autorevole in Europa. È dunque naturale che Gregory gli indirizzasse il suo opuscolo per richiedergli un giudizio su una questione tanto importante. Huygens non rispose immediatamente, ma qualche tempo dopo sul *Journal des Sçavants*, la nuova rivista che nel 1665 aveva inaugurato la comparsa dei periodici scientifici, pubblicò una recensione critica del libro di Gregory, insieme alla rivendicazione della propria priorità su alcune delle proposizioni enunciate da Gregory. Le critiche di Huygens diedero inizio ad una vivace discussione, che coinvolse anche i matematici inglesi Wallis e Lord Brouncker, in quanto entrambi i contendenti erano membri della Royal Society.

L'argomento che lasciava scettico Huygens sulla validità della conclusione di Gregory era in particolare la maniera di rappresentare «analiticamente» i poligoni iniziali I_0 e C_0 scelta da Gregory: chi poteva escludere che ci fosse un'altra maniera per rappresentare «analiticamente» i due poligoni, dalla quale poter ricavare un'espressione anche per il limite (la «terminatio») e dunque rispondere positivamente al problema? Anche se non era in grado di confutare l'argomento di Huygens (e del resto la cosa era impossibile, per le conoscenze matematiche del tempo), Gregory mantenne ferma la sua opinione mentre non pochi matematici — anche all'interno della Royal Society — continuarono a condividere lo scetticismo di Huygens e a ritenere ancora aperta la questione.

Nella *Vera quadratura* Gregory aveva inoltre applicato la stessa tecnica della coppia di successioni convergenti per quadrare l'arco di iperbole equilatera di equazione $xy=10^{25}$.

Egli costruiva geometricamente le coppie di successioni di poligoni circoscritti e iscritti e determinava l'area KMLI sottesa dal segmento di iperbole (data da $10^{25}\log 10$) e con un analogo «brute-force method» di approssimazione — come è stato efficacemente definito da Whiteside (1961, 227) — mostrava come si poteva trovare il logaritmo di un numero x (con $X_1<x<X_2$) con 25 cifre significative.

La relazione tra la quadratura dell'iperbole e i logaritmi era alla base anche del volume *Logarithmotechnia* di Mercator, apparso a Londra nel 1668, e apertamente ispirato ai metodi dell'*Arithmetica* di Wallis. Mercator partiva dalla considerazione dell'iperbole equilatera $y=1/(1+a)$ e dall'applicazione dell'algoritmo euclideo della divisione che gli dava:

$$\frac{1}{1+a}=1-a+a^2-a^3+\ldots$$

e dunque (in termini moderni):

$$\int_1^a \frac{1}{1+a}\,da=\int_1^a(1-a+a^2-a^3+\ldots)\,da.$$

Egli riusciva così a esprimere $\log(1+a)=\int_1^a \frac{1}{1+a}\,da$ mediante la serie infinita

$$\log(1+a)=a-a^2/2+a^3/3-\ldots,$$

un risultato che non si trova esplicitamente nel volume di Mercator, ma di cui egli doveva essere certamente in possesso, se nell'ultima pagina del suo scritto, sotto il titolo *Inventio summae logarithmorum* compare la serie

$$\int_0^a \log(1+a)da = a^2/2 - a^3/2.3 + a^4/3.4 - \ldots$$

che si ottiene in maniera evidente dalla precedente.

Dallo stesso sviluppo in serie di $\log(1+a)$, ponendo $a=1$, Mercator otteneva ancora la serie che dà $\log 2 = 1 - 1/2 + 1/3 - \ldots$ già ottenuta da Mengoli, mentre, eseguendo in essa la somma dei termini $(2n-1)$–esimo e $2n$–esimo si ha la serie

$$\log 2 = 1/1.2 + 1/3.4 + 1/4.5 + \ldots$$

che, indipendentemente da Mercator, Brouncker pubblicò quello stesso anno in *Squaring of the hyperbola*.

Manipolazione con serie infinite, tecniche di approssimazione, discussione dei problemi di quadratura e di ricerca delle tangenti annunciavano ormai che i tempi erano maturi per la conquista più importante della matematica del secolo: l'invenzione del calcolo.

BIBLIOGRAFIA

Testi

G. HUYGENS, *Œuvres complètes*, a cura della Société Hollandaise des Sciences, La Haye, Nijhoff, 1888-1950, 22 voll.

J. WALLIS, *Opera mathematica*, 1693-1699 (repr. Georg Olms, 1968), 3 voll.

Studi

E. BORTOLOTTI, *La storia della matematica nella università di Bologna*, Bologna, Zanichelli, 1947.

C. BOYER, *The History of the Calculus and Its Conceptual Development*, New York, Dover, 1959.

ID., *A History of Mathematics*, New York, Wiley and Sons, 1968 (trad. it.: *Storia della matematica*, Milano, ISEDI, 1976).

F. CAJORI, *William Oughtred, a Great Seventeenth-Century Teacher of Mathematics*, Chicago, Open Court, 1916.

J. Gregory Tercentenary Memorial Volume, a cura di H.W. Turnbull, Royal Society of Edinburgh, London, Bell, 1939.

C. HILL, *Intellectual Origins of the English Revolution*, Oxford, The Clarendon Press, 1965 (trad. it.: *Le origini intellettuali della Rivoluzione inglese*, Bologna, Il Mulino, 1976).

E.W. HOBSON, *John Napier and the Invention of Logarithms*, Cambridge, Cambridge University Press, 1914.

R.H. KARGON, *Atomism in England from Hariot to Newton*, Oxford, The Clarendon Press, 1966 (trad. it.: *L'atomismo in Inghilterra da Hariot a Newton*, Bologna, Il Mulino, 1983).

M. KLINE, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times*, New York, Oxford University Press, 1972.
J.A. LOHNE, *Essays on Thomas Harriot*, in «Archive for History of Exact Sciences», vol. 20, 1979, pp. 189-312.
G. LORIA, *Storia delle matematiche dall'alba della civiltà al tramonto del secolo XIX*, Milano, Hoepli, 1950.
Napier Tercentenary Memorial Volume, a cura di C.G. Knott, London, Longmans Green, 1915.
J.F. SCOTT, *The Mathematical Work of John Wallis, D.D., F.R.S. (1616-1703)*, London, Taylor and Francis, 1938.
C.J. SCRIBA, *Studien zur Mathematik des John Wallis (1616-1703)*, Wiesbaden, Steiner, 1966.
ID., *Gregory's converging double sequence*, in «Historia Mathematica», vol. 10, 1983, pp. 274-285.
Studies on Christiaan Huygens, a cura di H.J.M. Bos e altri, Lisse, Swets & Zeitlinger, 1980.
E.G.R. TAYLOR, *The Mathematical Practitioners of Tudor and Stuart England*, Cambridge, Cambridge University Press, 1954.
D.T. WHITESIDE, *Patterns of Mathematical Thought in the later Seventeenth Century*, in «Archive for History of Exact Sciences», vol. 1, 1961, pp. 179-388.
H.G. ZEUTHEN, *Geschichte der Mathematik im 16. und 17 Jahrhundert*, Leipzig, Teubner, 1903.

XI. *L'universo infinito e i mondi abitati* (di Paolo Rossi)

1. Ordine e disordine nell'universo. - 2. L'antropocentrismo di Keplero. - 3. Contro l'antropocentrismo: Galilei e Descartes. - 4. La pluralità dei mondi. - 5. Il *Cosmotheoros* di Huygens. - 6. La fine della concezione «terrestre» dell'universo.

1. *Ordine e disordine nell'universo.*

Nicola Cusano è il nome italianizzato del filosofo tedesco Nikolaus Krebs (1401-1464) che studiò diritto a Heidelberg e a Padova e teologia a Costanza. Cusano partecipò al concilio di Basilea (1433), fu ambasciatore di papa Eugenio IV a Costantinopoli in preparazione del concilio di Firenze (1439). Nominato cardinale nel 1448, fu legato pontificio in Germania e vescovo di Bressanone dopo il 1450. I grandi temi della tradizione del platonismo medioevale e della tradizione mistica tedesca ricompaiono nella sua opera in una sintesi di grande vigore speculativo. Nel *De docta ignorantia* (1440) la teologia negativa (si può conoscere Dio solo *per viam negationis*) veniva estesa all'intera filosofia. L'universo è un insieme di simboli e di segni di Dio. Attraverso le metafore, i simboli e le figure della geometria, la mente tende infinitamente ad adeguarsi a Dio, così come un poligono, aumentando il numero dei suoi lati, tende infinitamente ad adeguarsi al cerchio. Dio, che è coincidenza degli opposti, si diffonde e si esplica nel mondo; quest'ultimo è una imitazione di Dio, un «Dio creato». Se è immagine e manifestazione di Dio, il mondo non può che essere infinito. In questa infinità, centro e circonferenza coincidono: «considerati i vari moti degli orbi, è impossibile che la macchina del mondo abbia per centro fisso ed immobile o questa terra sensibile, o l'aria, o qualunque altra cosa» (*Opera*, I, 99). Il centro del mondo non è un punto fisico, è una realtà metafisica: coincide con la circonferenza e con Dio stesso: «La macchina del mondo avrà, per così dire,

il proprio centro in ogni luogo e in nessun luogo la circonferenza, perché suo centro e circonferenza è Dio, il quale è dovunque e in nessun luogo» (*Ibid.*, 103). In questa infinità ogni moto si configura come relativo e la stessa Terra può apparire in movimento: «È ormai manifesto che questa terra si muove, benché ciò non ci appaia. Infatti noi non apprendiamo il moto se non in riferimento a qualcosa di fisso. Se infatti qualcuno, posto su una nave in mezzo alla corrente, non sapesse che l'acqua scorre e non vedesse le rive, come potrebbe sapere che la nave è in movimento?» (*Ibid.*).

Nella prospettiva di Cusano l'universo è infinito perché in esso si rispecchia l'infinità del Creatore. Ma di questo infinito universo è impossibile, proprio sulla base della *coincidentia oppositorum* e dell'assoluto relativismo, offrire una rappresentazione oggettiva. Il rifiuto delle cosmologie tradizionali non nasce in Cusano dalla convinzione che sia possibile sostituire ad esse un nuovo sistema del mondo, ma dalla radicale messa in discussione dell'ideale stesso dell'astronomia-cosmologia, il quale consiste nel tentativo di interpretare le regolarità e le *apparenti* irregolarità dei moti celesti «salvando le apparenze» e riconducendo ciò che si vede nel cielo ad un sistema regolare di moti. Il matematico Cusano finisce in realtà, come ha osservato Koyré, per negare la possibilità stessa di una interpretazione matematica della natura (Koyré 1970, 23).

Keplero si richiamerà di continuo alle speculazioni filosofiche e geometriche del «divino Cusano», Descartes farà riferimento alla sua tesi dell'infinità del mondo come a una dottrina sostenuta da un ecclesiastico che non fu per questo mai rimproverato dalla Chiesa. Su Bruno l'influenza di Cusano sarà decisiva. In realtà le sue tesi e le sue dottrine, rilette *dopo* la rivoluzione copernicana e la radicale messa in discussione della tradizionale immagine del mondo, contribuirono a far circolare l'idea che il cosmo potesse *non essere* un sistema ordinato, armonioso e coerente. L'idea dell'ordine del mondo, della sua armonia, della sua perfetta proporzione era tradizionalmente legata all'immagine di un universo *finito*. Le conclusioni di carattere cosmologico che potevano essere ricavate da affermazioni relativistiche, dalla dissoluzione dei paradigmi consolidati, dalla affermazione della mobilità della Terra sembrarono mettere in crisi non solo il sistema tolemaico, ma l'idea stessa che l'universo avesse una *forma*, potesse essere ancora interpretato come un *sistema*. Proprio questa possibilità colpiva con forza l'immaginazione di Francis Bacon nel 1612: l'affermazione dell'infinità dell'universo (congiunta alle incertezze dell'astronomia, alla sua riduzione a pura «matematica», alla sua rinuncia a presentare un quadro *fisico* del mondo) non poteva condurre a mettere in dubbio o a rinnegare l'idea stessa di un *sistema del mondo*? non poteva condurre a concepire l'universo come un insieme frammentario e *disordinato* di globi sparsi nello spazio, senza più

alcun punto di riferimento o alcuna forma o sistema o centro comune al tutto? (*Works*, III, 741). La preoccupazione di Bacone non era molto diversa, nella sostanza, da quella che abbiamo visto espressa, un anno prima, dai versi di John Donne: non ha il mondo perso ogni coerenza, non è stato nuovamente «sbriciolato nei suoi atomi»?

Alla distruzione dell'immagine cosmologica di un universo ordinato fondato su immutabili leggi, e dell'astronomia come ricerca di modelli matematici, conducevano anche le tesi legate al vitalismo della tradizione magico-ermetica la quale concepiva i corpi celesti come animati e viventi. Se le stelle sono davvero «divini animali» dotati di mente e di intelligenza, se esse «volano» in un cielo «liquido» (o privo di sfere) come un branco di gru, se i loro moti sono ordinati come, appunto, quelli di un branco di animali, allora i pianeti descrivono *realmente* i moti irregolari che appaiono alla vista, allora non c'è più alcun bisogno di elaborare calcoli o modelli, di effettuare misure, di salvare le apparenze. Ciò che appare (proprio come quando guardiamo volare un branco di gru) è ciò che realmente accade. Di fronte a tesi di questo genere, avanzate con forza da Francesco Patrizi nel 1591, Keplero avrà una reazione durissima. Ai modelli, alle misurazioni, ai calcoli, alle figure della geometria si deve far ricorso sia per spiegare le regolarità, sia le apparenti irregolarità dei moti celesti. Leggi e regolarità vanno rintracciate al di là del disordine apparente, al di là di ciò che immediatamente appare ai sensi. L'astronomia presuppone la vista, ma non si esaurisce in essa: non consiste nel guardare il cielo. Ci sono alcuni, scrive Keplero nel 1603, che «disprezzano la fatica, il lavoro, il sapere, la scienza di duemila anni e cercano di far rinascere quel tipo di astronomia che rinuncia ad ogni spiegazione delle cause, si affida solo alla vista, rinuncia alle spiegazioni fondate sulle figure e sui numeri». Costoro, conclude Keplero in un tono insolitamente irato, «o stanno delirando, oppure, come quel tale Patrizi, sono in preda ad una forma di lucida follia» (*Werke*, XIV, 431).

Cum ratione insanire erano i termini usati da Keplero, per il quale Patrizi era solo uno degli esempi di una tendenza in atto nella cultura del suo tempo. Le tesi di Patrizi (che ricorda Copernico, assieme a Tycho Brahe (!), come un sostenitore dell'esistenza delle sfere celesti) non derivavano certo dal quadro geometrico del mondo che Copernico aveva tracciato nel *De revolutionibus*. In esso l'universo continuava a identificarsi con il sistema solare e manteneva un suo centro attorno al quale ruotavano, in virtù della loro forma sferica, le sfere solide e reali. Quell'universo non era infinito. Era racchiuso «dalla prima e suprema sfera delle stelle fisse, che contiene se medesima e tutte le cose, che pertanto è immobile ed è il luogo dell'universo al quale si rapportano il moto e la posizione di tutte le altre stelle» (Copernico 1975, 99).

Di fronte a molte reazioni a Copernico, così come di fronte alle molte incertezze di fronte alla nuova astronomia, non va dimenticato il peso grandissimo esercitato sulla cultura di tutta Europa dal pensiero e dall'opera di Giordano Bruno (1548-1600). Le sue opere vennero avidamente cercate e lette (una copia dello *Spaccio della bestia trionfante* verrà venduta a Londra, nel 1712, per trenta sterline!), il suo nome diventò un simbolo. La teoria copernicana non è per Bruno una pura ipotesi matematica, come vuole quell'«asino ignorante et presuntuoso» (che è poi Osiander) che ha scritto la prefazione al *De revolutionibus*. Non è, agli occhi di Bruno, solo un nuovo sistema astronomico. È una nuova concezione del mondo: è insieme la conquista di una verità e uno strumento di liberazione: «Questa è quella filosofia che apre gli sensi, contenta il spirito, magnifica l'intelletto e riduce l'uomo alla vera beatitudine, che può avere come uomo». La metafisica cusaniana della coincidenza degli opposti e dell'infinito serve a Bruno per saltare i confini del mondo ancora finito di Copernico. La *Cena delle ceneri* (1584) contiene un esame e una confutazione delle classiche obiezioni al moto della Terra che Koyré ha giudicato «la migliore refutazione che sia mai stata scritta prima di Galilei» (Koyré 1970, 38) e contiene inoltre la decisa affermazione dell'infinità dell'universo e della relatività di tutte le posizioni: «il mondo essere infinito, e però non essere corpo alcuno in quello, al quale simplicemente convenga esser nel mezzo, o nell'estremo, o tra que' due termini». L'infinità del mondo, prodotto da una Causa infinita, è l'infinità dello spazio: «Cotal spacio lo diciamo infinito, perché non v'è raggione, convenienza, possibilità, senso o natura che debba finirlo... La Terra dunque non è absolutamente in mezzo de l'universo, ma al riguardo di questa nostra regione... Così si magnifica l'eccellenza di Dio, si manifesta la grandezza dell'imperio suo: non si glorifica in uno, ma in Soli innumerevoli; non in una terra, in un mondo, ma in ducento mila, dico in infiniti» (*Opere italiane*, I, 275, 309).

Movimento e mutamento sono, per Bruno, realtà positive. Quiete e stasi sono sinonimo di morte. Solo ciò che muta è vivente e la perfezione coincide con il divenire e il mutamento: «Non sono fini, termini, margini, muraglia che ne defrodino e suttraggano l'infinita copia de le cose... perché dall'infinito sempre nuova copia di materia sottonasce» (*Ibid.*, 274). Nella stessa pagina del *De l'infinito universo e mondi* (1584) Bruno si richiamava a Democrito ed Epicuro. Il pensiero di questi due filosofi che ritengono che tutto si rinnovi nell'infinito universo è preferibile a quello di coloro che si sforzano «di salvare eterna la costanza dell'universo, perché medesimo numero a medesimo numero sempre succeda e medesime parti della materia con le medesime sempre si convertano» (*Ibid.*, 274).

Il mondo di Copernico e gli innumerevoli analoghi mondi di cui parla

Bruno sono collocati da quest'ultimo all'interno di uno spazio infinito e omogeneo «che chiamar possiamo liberamente vacuo». Il vuoto infinito della tradizione democritea e lucreziana diventa una sorta di «sede naturale» per il sistema solare di Copernico e per una pluralità di tali sistemi (Kuhn 1972, 303). Si è parlato, a proposito dell'universo vivente di Bruno, di *astrobiologia.* Bruno non si limita a interpretare le sfere e gli epicicli come «empiastri e ricettarii per medicar la natura... al servizio di Maestro Aristotele»; rifiuta la circolarità e la regolarità dei moti celesti e l'idea stessa di ogni movimento «continuo et regolare circa il centro»; afferma l'impossibilità, nell'universo fisico, di moti perfetti e di forme perfette. Nelle leggi dei moti dei corpi celesti vede qualcosa che è proprio dei singoli astri e pianeti. Egli affida all'«anima propria» degli astri il cammino che essi compiono nei cieli: «Questi corridori hanno il principio di moti intrinseco la propria natura, la propria anima, la propria intelligenza».

Bruno opera una netta distinzione tra l'*universo* e i *mondi.* Parlare di un sistema del mondo non vuol dire, nella sua visione del cosmo, parlare di un sistema dell'universo. L'astronomia è legittima e possibile come scienza del mondo che cade nell'ambito della nostra percezione sensibile. Ma, al di là di esso, si estende un universo infinito che contiene quei «grandi animali» che chiamiamo astri, che racchiude una pluralità infinita di mondi. Quell'universo non ha dimensioni né misura, non ha forma né figura. Di esso, che è insieme uniforme e senza forma, che non è né armonico né ordinato, non può in alcun modo darsi un *sistema.*

Nella appassionata *Apologia pro Galilaeo* (1616), scritta dal carcere in cui era sepolto dal 1599, Tommaso Campanella (1568-1639) insisterà con forza sulla differenza profondissima che intercorre fra l'ammettere l'esistenza di più mondi coordinati a formare un *unico sistema* e l'ammettere invece una pluralità di mondi disordinatamente sperduti in uno spazio infinito. Grazie ai suoi strumenti ammirevoli, afferma Campanella, Galileo ci ha mostrato astri finora sconosciuti, ci ha insegnato che i pianeti sono simili alla Luna, ricevono la loro luce dal Sole e ruotano gli uni attorno agli altri. Da Galileo abbiamo appreso che in cielo si danno trasmutazioni di elementi, che esistono nubi e vapori fra le stelle, che esiste un gran numero di mondi. Il nono degli undici *Argumenta contra Galilaeum* discussi da Campanella affermava che da tali opinioni consegue che esistono più mondi. Le affermazioni di Galilei, chiarisce fra' Tommaso, non vanno confuse con quelle di Democrito e di Epicuro: Galileo ha sostenuto che tutti i sistemi mondani sono contenuti in un unico sistema, racchiusi in un unico spazio e coordinati in una più vasta unità: «Ammettere più mondi non coordinati a costituirne uno solo, come fecero Democrito ed Epicuro, è errore di fede, perché ne deriva che i mondi si formano a caso senza l'intervento ordinatore

di Dio. Invece, concepire molti sistemi minori in seno ad uno massimo ordinato secondo la mente divina, non è affatto contrario alla Scrittura, ma solo ad Aristotele». Galileo, ripeterà poco più avanti, «non plures mundos, sed plura systemata detegit, ordinata ad unum» (Campanella 1968, 50-51).

L'esistenza di mondi non coordinati a costituirne uno solo è al centro della speculazione di Bruno. Copernico, Keplero, Tycho Brahe, Galilei (al di là delle differenze) mantengono invece ben salda l'immagine di un universo ordinato come un sistema unitario. Esso è, ai loro occhi, l'espressione di un ordine divino, la manifestazione di principi o archetipi matematico-geometrici. «Dico che delle cose da esso (Aristotele) dette fin qui, convengo seco ed ammetto che il mondo sia corpo dotato di tutte le dimensioni, e però perfettissimo; ed aggiungo che come tale ei sia necessariamente ordinatissimo, cioè di parti con sommo e perfettissimo ordine fra loro disposte». Queste parole di Galilei (*Opere*, VII, 55-56) costituiscono un'alternativa radicale rispetto all'immagine bruniana dell'universo. La singolare commistione, che è presente in Bruno, di temi attinti al platonismo di Cusano e al materialismo di Lucrezio avevano generato l'immagine di un universo «posto a caso» che verrà rifiutata non solo perché empia, ma perché contrastante con una tradizione millenaria e davvero difficile da accettare.

Su questo punto anche Isaac Newton sarà fermissimo: la mirabile disposizione del Sole, dei pianeti, delle comete può essere solo opera di un Essere onnipotente e intelligente. Non solo: «Se le stelle fisse sono centri di altri simili sistemi, questi ultimi, essendo formati da un simile saggio disegno devono essere tutti soggetti al dominio dell'Uno, specialmente perché la luce delle stelle fisse è della stessa natura della luce del Sole e la luce passa da ogni sistema in tutti gli altri sistemi. Per timore che i sistemi delle stelle fisse potessero cadere l'uno sull'altro a causa della loro gravità, Dio ha collocato questi sistemi ad una immensa distanza l'uno dall'altro».

2. *L'antropocentrismo di Keplero.*

In un celebre libro pubblicato nel 1936 e intitolato *The great chain of Being*, il teorico e il fondatore della «storia delle idee», l'americano Arthur O. Lovejoy, elencava le cinque idee innovatrici o «tesi cosmografiche rivoluzionarie» che caratterizzarono nel secondo Seicento e nel Settecento la nuova visione dell'universo: 1) l'affermazione secondo la quale altri pianeti del nostro sistema solare sono abitati da creature viventi, senzienti e razionali; 2) la demolizione delle mura esterne dell'universo medioevale, sia che queste si identificassero con l'estrema sfera cristallina oppure con una determinata regione delle stelle fisse, e la dispersione di queste stelle entro spazi vasti e

irregolari; 3) la convinzione che le stelle fisse siano soli simili al nostro, tutti o quasi tutti circondati da propri sistemi planetari; 4) l'ipotesi che anche i pianeti di questi altri mondi possano essere abitati da esseri ragionevoli; 5) l'affermazione della effettiva infinità dello spazio dell'universo fisico e del numero dei sistemi solari in esso contenuti.

Lovejoy vedeva giustamente in Giordano Bruno non solo l'apostolo entusiasta della verità copernicana, ma anche il principale rappresentante della dottrina di un universo decentrato, infinito e infinitamente popolato. Ed aveva anche ragione nell'affermare che nessuna delle cinque tesi precedentemente elencate era presente in Copernico e che sia la dottrina dell'infinità dell'universo sia quella della pluralità dei mondi furono variamente respinte dai tre più grandi astronomi dell'età di Bruno e della generazione successiva: Tycho Brahe, Keplero e Galilei.

Keplero si oppone recisamente alla infinitizzazione dell'universo prospettata da Bruno, respinge l'assimilazione del Sole alle stelle fisse, mantiene ferma l'unicità e la «eccezionalità» del sistema solare contrapponendolo alla immobile congerie delle stelle fisse. I centri delle stelle fisse sono disposti su una medesima superficie sferica? Dato che alcune fisse ci appaiono più piccole e altre più grandi, le piccole potrebbero apparire tali perché più lontane e le grandi perché più vicine. Ma non è nemmeno assurdo pensare che due stelle fisse, di grandezza apparente ineguale, siano ad eguale distanza da noi (*Opera*, VI, 136). Nell'*Epitome astronomiae copernicanae* (1617-1621) la questione appare a Keplero «incerta». Ma se anche i centri delle fisse non fossero su un'unica superficie sferica, resta vero per Keplero che l'universo «ha nel centro un vuoto immenso, una grande cavità, attorniata dalla schiera delle fisse, ossia circoscritta e chiusa come da una parete o da una volta, ed è all'interno di questa immensa cavità che è racchiusa la nostra Terra con il Sole e le stelle mobili» (*Ibid.*, 137).

Sia *prima* sia *dopo* le scoperte effettuate da Galilei con il cannocchiale Keplero mantiene ben saldo il suo rifiuto delle tesi infinitiste di Bruno. L'universo è costruito da un Dio geometra ed ha uno schema geometrico: il vuoto coincide con *il nulla* e le stelle fisse non sono disperse irregolarmente o irrazionalmente nello spazio: «Come si può trovare nell'infinito un centro, che nell'infinito è dovunque? Infatti un qualsiasi punto dell'infinito dista egualmente, cioè infinitamente, dagli estremi infinitamente distanti. Dal che risulterà che il medesimo punto sarà centro e non sarà centro, e molte altre cose contraddittorie, che molto correttamente eviterà colui il quale, trovando il cielo delle stelle fisse limitato al suo interno, lo limiterà anche all'esterno» (*Opera*, II, 691, cfr. Koyré 1970, 59). Il sistema solare resta un *unicum* nell'universo. Delle scoperte effettuate da Galilei mediante il cannocchiale si possono dare due interpretazioni possibili: le nuove stelle fisse che Galilei ha

visto non erano prima visibili ad occhio nudo o perché troppo lontane o perché troppo piccole. Fra queste due interpretazioni, Keplero sceglie risolutamente la seconda (Koyré 1970, 63).

La *Dissertatio cum Nuncio Sidereo* pubblicata da Keplero nel 1610 è mossa da una preoccupazione fondamentale: mostrare che le scoperte astronomiche galileiane non costituiscono in alcun modo una prova della validità della cosmologia infinitista di Bruno. Keplero contrappone il mondo immobile dello spazio e delle stelle fisse al mondo mobile che comprende i pianeti e la Terra. Non può essere sfavorevolmente colpito dalla scoperta di nuove *lune* o satelliti che ruotino attorno ad uno dei pianeti del sistema solare. La scoperta di nuovi pianeti ruotanti attorno ad una delle stelle fisse varrebbe invece a mettere in crisi la sua cosmologia, a dare ragione alle tesi di Bruno e del suo amico Wackher von Wackhenfeltz, con il quale egli discute il problema, e che è un entusiasta seguace delle dottrine bruniane. Se Bruno ha ragione, se il sistema solare non è più equidistante dalle stelle fisse, se l'universo non ha più centro e non ha più confini, allora dovrebbe essere abbandonata l'immagine di un universo costruito per l'uomo e l'immagine dell'uomo Signore del creato.

A questo abbandono Keplero non è minimamente disposto. Le pagine iniziali della *Dissertatio* sono un documento straordinario. Con la sincerità che caratterizza tutti i suoi scritti, Keplero dà conto della situazione e dei suoi atteggiamenti *dopo* aver avuto notizia che Galilei ha visto in cielo nuove «stelle», ma *prima* di sapere di quali stelle si tratti. In attesa di vedere il testo del *Sidereus Nuncius* Keplero e von Wackhenfeltz danno di esso due diverse interpretazioni: secondo Keplero è possibile che Galilei abbia visto quattro piccole lune ruotare attorno ad uno dei pianeti, a Wackhenfeltz sembra invece certo che i nuovi pianeti fossero stati visti girare attorno a qualche stella fissa. Questa era una possibilità che Wackhenfeltz aveva già prospettato a Keplero «ricavandola dalle speculazioni del Cardinale Cusano e di Giordano Bruno». La lettura del testo galileiano dà ragione a Keplero ed egli ne esce rincuorato: «Se tu (Galilei) avessi scoperto dei pianeti ruotanti attorno ad una delle stelle fisse, già erano pronti per me i ceppi e il carcere presso le innumerabilità di Bruno o anzi piuttosto l'esilio in quell'infinito. Per il momento mi hai dunque liberato dal grande timore che era sorto in me alla prima notizia del tuo libro a causa del grido di trionfo del mio oppositore» (*Werke*, IV, 304).

La Terra resta per Keplero la sede più alta dell'universo, l'unica adatta all'uomo, signore del creato. Proprio sulla base della impossiblità di concepire una natura «autonoma» che sussista indipendentemente da un essere intelligente capace di contemplarla e di godere del suo spettacolo, Keplero pensa alla possibilità di altri abitanti all'interno del sistema solare. È

chiaro, scrive, che quei quattro pianeti che ruotano attorno a Giove «sono stati apparecchiati per le creature che abitano tutt'intorno al globo di Giove» (*Ibid.*, 306). Ma di fronte a questa ipotesi si riaffaccia con forza la preoccupazione antropocentrica di Keplero: se vi sono in cielo terre abitate, forse stiamo per venire a gara con esse per «sapere chi tenga nel mondo il posto migliore? come possono essere tutte le cose per l'uomo? e come possiamo noi essere i signori delle opere di Dio?». Il sistema dei pianeti in uno dei quali ci troviamo è comunque per Keplero collocato «nel luogo principale dell'universo, intorno al cuore dell'universo che è il Sole». Entro quel sistema di pianeti, la Terra occupa la posizione centrale fra i globi primari (all'esterno: Marte, Giove, Saturno; all'interno: Venere, Mercurio, il Sole). Dalla Terra si è ancora in grado di distinguere Mercurio, che non sarebbe visibile da Giove o da Saturno. La Terra è «la sede della creatura contemplatrice in grazia della quale fu creato l'universo», è il luogo che «del tutto si addice alla creatura più importante e più nobile fra le corporee» (*Werke*, VII, 279; IV, 308).

Contro la tesi dell'infinità del cosmo, Keplero disponeva tuttavia di un argomento assai «forte», la cui importanza doveva essere rilevata due secoli più tardi. Galilei pensa che, oltre alle fisse note fino dall'antichità, il cielo sia popolato da più di 10.000 stelle. Keplero è giunto a questa cifra sulla base di un calcolo approssimativo per difetto. Ma non importa: «quanto più fitte e numerose esse sono, tanto più è valida la mia argomentazione contro l'infinità del mondo» (Kepler 1972, 55). Se anche soltanto di mille stelle fisse non ve ne fosse alcuna più grande di un minuto (e quelle finora misurate risultano più grandi), riunite assieme, eguaglierebbero e supererebbero il diametro del Sole. E cosa accadrebbe con diecimila stelle? Se quei Soli sono del medesimo genere del nostro Sole, «perché mai anche tutti quei Soli messi insieme non superano in splendore questo nostro Sole?» (*Ibid.*) Questo argomento di Keplero è la radice storica del celebre «paradosso del cielo notturno» che verrà discusso da Edmund Halley negli anni Venti del Settecento e, esattamente un secolo più tardi, dall'astronomo tedesco Heinrich Olbers.

Il passaggio dal mondo chiuso di Tolomeo e di Copernico all'universo infinito di Newton e di Kant non assomigliò affatto — o comunque non assomigliò sempre — ad una esaltante scoperta del nuovo o ad un eccitante viaggio intellettuale. Il timore di un «mondo sbriciolato» non era prerogativa solo dei poeti. Con il candore impietoso verso se stesso che lo caratterizza, Keplero parla del suo timore e tremore di fronte alla possibilità che l'universo sia davvero non-strutturato, così come aveva pensato Giordano Bruno: «Quel pensiero reca con sé non so quale segreto, nascosto orrore: ci si sente perduti in quella immensità alla quale sono negati limiti e centro, alla quale è negato, di conseguenza, ogni luogo determinato» (*Opera*, II, 688).

3. *Contro l'antropocentrismo: Galilei e Descartes.*

Simplicio, nel *Dialogo sui massimi sistemi* di Galileo Galilei, qualifica «pensiero o favoloso o empio» l'ipotesi di uomini sulla Luna e quella ipotesi viene respinta con decisione anche da Galilei. Ma il conservatore e il tradizionalista Simplicio sostiene anche che «non doviamo ammettere nessuna cosa essere stata creata in vano ed essere oziosa nell'universo». Di fronte all'ampliamento dell'universo che consegue all'accettazione del sistema copernicano l'esponente dell'aristotelismo reagisce con domande di questo tipo: i pianeti sono disposti in bell'ordine attorno alla Terra in distanze proporzionate e tali da produrre i loro effetti sulla Terra «per benefizio nostro». A che scopo, «per comodo ed utile di chi» bisognerebbe interporre fra l'orbe supremo di Saturno e la sfera delle fisse «uno spazio vastissimo senza stella alcuna, superfluo e vano»? (*Opere*, VII, 393-397).

Galilei non è affatto sulle stesse posizioni di Keplero. Non accetta l'antropocentrismo di Simplicio. A quelle domande Salviati risponde che «troppo ci arroghiamo, mentre vogliamo che la sola cura di noi sia l'opera adequata ed il termine oltre al quale la divina sapienza e potenza niuna altra cosa faccia o disponga» e che «è temerità voler far giudice il nostro debolissimo discorso delle opere di Dio, e chiamar vano o superfluo tutto quello dell'universo che non serve per noi» (*Ibid.*). Su questo terreno e relativamente a questi problemi Galilei è tuttavia molto cauto. Sagredo, nel suo intervento, corregge la posizione di Salviati e tende a sfumarne la portata: trasforma il «non serve per noi» in un più ambiguo «che noi non sappiamo che serva per noi». E tuttavia la conclusione è dichiaratamente antiantropocentrica: «Grandissima mi par l'inezia di coloro che vorrebbero che Iddio avesse fatto l'universo più proporzionato alla piccola capacità del loro discorso, che all'immensa, anzi infinita sua potenza» (*Ibid.*).

Galilei — e ciò gli verrà rimproverato da Keplero — non ricorda mai, né nelle sue opere né nelle sue lettere, il nome di Giordano Bruno. Come ha analiticamente documentato Alexandre Koyré (1970, 71-78), egli non partecipa al dibattito sulla finitezza o infinità dell'universo, dichiara di non aver mai preso una decisione e (anche se propenso all'infinità) considera la questione insolubile: non è provato, né lo sarà in eterno, «che le stelle del firmamento siano collocate tutte in un medesimo orbe», nessuno sa né potrà mai sapere non solo «quale sia la figura (del firmamento), ma se egli ha figura veruna» (*Opere*, VI, 523, 518). Nel *Dialogo* si trova l'affermazione che «le stelle fisse sono tanti soli» e che «non sappiamo dove trovare o se esiste del tutto il centro dell'universo», ma si trova anche la recisa negazione dell'infinità dell'universo (*Ibid.*, VII, 306). Per l'una o per l'altra delle due soluzioni, scrive nel 1639 a Fortunio Liceti, vengono contemporaneamente

avanzate «argute ragioni... ma nel mio cervello né queste né quelle concludono necessariamente, sì che resto sempre ambiguo quale delle due asserzioni sia vera». C'è una sola ragione che lo inclina verso la tesi dell'infinità: è più facile riferire la incomprensibilità all'incomprensibile infinito che al finito che non è incomprensibile. Ma si tratta, conclude, di una di quelle questioni, come la predestinazione e il libero arbitrio, «per avventura inesplicabili da i discorsi umani» (*Ibid.*, XVIII, 106).

Il ragionamento esposto da Galilei a Liceti non manca di sottigliezza: se sono incerto relativamente alla questione finito-infinito, se non so decidere, allora è probabile che l'universo sia infinito, perché, se fosse finito, non vivrei questa indecisione e questa incertezza. Descartes, nei *Principia* (1644), fa un ragionamento diverso: non dobbiamo avvolgerci nelle dispute sull'infinito perché sarebbe ridicolo che noi, che siamo finiti, cercassimo di determinare qualcosa e, con questo mezzo, supporlo finito tentando di comprenderlo. L'esame dell'infinito, condotto da una mente finita, presuppone la sua riduzione a finito. Solo coloro che immaginano che il loro spirito sia infinito si avvolgono in tali questioni (per esempio se la metà di una linea è infinita o se il numero infinito è pari o dispari). A questi problemi bisogna rifiutarsi di rispondere: «non bisogna cercare di comprendere l'infinito, ma solo pensare che tutto ciò in cui non troviamo nessun limite è indefinito» (*Opere*, II, 39). Nella serie dei numeri, così come nell'estensione del mondo, si può sempre «procedere oltre»: «chiameremo queste cose indefinite piuttosto che infinite, al fine di riservare a Dio solo il nome di infinito» (*Ibid.*).

Nella corrispondenza con il filosofo neoplatonico inglese Henry More (1614-1687) che si richiamava contemporaneamente a Bruno, a Lucrezio, alla tradizione cabalistica, alla filosofia cartesiana, Descartes chiarisce ulteriormente la sua distinzione fra indefinito e infinito. L'affermazione del carattere indefinito dell'estensione basta a far fronte all'obiezione di More per la quale un'estensione limitata e un numero limitato di vortici comporterebbero (per effetto della forza centrifuga) una dispersione in atomi e pulviscoli erranti dell'intera macchina cartesiana del mondo. Non è possibile immaginare un luogo fuori dell'estensione (o della materia) nel quale queste particelle potrebbero sfuggire.

In un universo che non ha limiti né confini la nozione di centralità dell'uomo nell'universo tende a perdere senso. L'antropocentrismo è una manifestazione di orgoglio, è la manifestazione dell'incapacità a cogliere la grandezza del Creatore e insieme della pretesa di imporre al creato il nostro privilegiato punto di vista. Pensando che Dio ha creato tutte le cose solo per il nostro uso, presumiamo troppo da noi stessi: «Non è in alcun modo verosimile che tutte le cose siano state fatte per noi in modo tale che Dio non abbia avuto altro scopo creandole... un'infinità di cose sono ora nel mondo,

ovvero ci sono state un tempo ed hanno già interamente cessato di essere, senza che nessun uomo le abbia mai vedute o conosciute e senza che gli siano mai servite a nessun uso» (*Opere*, II, 118). Dato che non possiamo conoscere i fini di Dio, aveva già scritto in una lettera del 1641, sarebbe assurdo sostenere che Dio, creando l'universo, non abbia avuto altro fine che la lode dell'uomo e che il Sole sia stato creato al solo scopo di fornire all'uomo la luce (*Correspondance*, V, 54). La piccolezza della Terra paragonata alla grandezza del cielo potrà sembrare incredibile solo a coloro che non hanno un sufficiente concetto di Dio e che ritengono che «la Terra è la parte principale dell'universo perché è la dimora dell'uomo, a beneficio del quale essi sono convinti senza ragione alcuna che tutte le cose siano fatte» (*Opere*, II, 138).

Sugli abitanti degli altri mondi e sull'esistenza di altre creature intelligenti nell'universo, Cartesio sostiene che la questione è indecidibile, ma afferma che il mistero dell'incarnazione e tutti gli altri favori che Dio ha concesso agli uomini non impediscono «che egli possa averne accordati infiniti altri a un'infinità di creature». Dichiara di «lasciare sempre in sospeso siffatte questioni, preferendo non negarne e non affermarne niente» (*Opere*, II, 626-627). Al termine della sua vita, tuttavia, e proprio in funzione polemica contro l'antropocentrismo, Cartesio riaffacciava l'ipotesi di una pluralità di mondi abitati. Credersi «carissimi a Dio» è comune consuetudine degli uomini ed essi pensano, su questa base, che tutto sia stato fatto per loro, che la loro Terra venga «prima di tutto». Ma sappiamo se Dio ha prodotto qualcosa nelle stelle? se ha collocato in esse «creature di specie diversa, altre vite, e, per così dire, altri uomini, o almeno esseri analoghi agli uomini?». Quasi profondendo nella creazione la sua potenza, Dio potrebbe aver prodotto infinite specie di creature: «non dobbiamo presumere troppo, come se tutto fosse in nostro potere e in funzione nostra, mentre forse altrove esistono altre innumerevoli creature di gran lunga migliori di noi» (*Opere*, II, 696).

4. *La pluralità dei mondi.*

Keplero crede all'esistenza di una parete o di una «volta» (usa anche l'espressione *cutis sive tunica*, pelle o camicia) che racchiude l'immensa cavità al cui centro è il Sole. Tycho Brahe crede che l'universo sia finito e racchiuso dalla sfera delle fisse. Galilei teorizza una posizione di inevitabile incertezza. Le cinque tesi cosmografiche rivoluzionarie delle quali si è parlato all'inizio del paragrafo 2 non sono da ricercare all'interno dei discorsi «rigorosi» dei maggiori astronomi del Seicento. Quelle tesi si affermano con forza nella cultura (e si rifletteranno più tardi nelle prospettive della

cosmologia) in ambienti caratterizzati da una singolare mescolanza di temi democriteo-lucreziani e copernicani, neoplatonici ed ermetici. Su questo stesso terreno, che è assai diverso da quello al quale avevano fatto riferimento gli astronomi, dovevano rafforzarsi e giungere a piena maturazione il rifiuto dell'antropocentrismo e l'immagine di una natura infinitamente più potente dell'uomo nel cui ambito, come dirà Leibniz, *non omnia hominun causa fieri* (*Phil. Schr.* I, 150).

Platonismo ed ermetismo sono componenti fondamentali del pensiero dei sostenitori dell'infinità del mondo: da Cusano a Palingenio Stellato, da Thomas Digges a Giordano Bruno e a Henry More. Anche nel *De magnete* (1600) di William Gilbert, un autore saldamente legato al vitalismo ermetico, era presente la tesi che «i lumi grandi e molteplici» delle stelle fisse fossero posti non in una superficie sferica, né in una volta, ma a diverse e grandissime altezze. Intrecciata alla discussione sull'infinità dell'universo, la disputa sulla pluralità e sulla abitabilità dei mondi si richiama ad una tradizione assai antica i cui elementi di fondo, nei primi anni del Cinquecento, erano stati accuratamente riassunti da Giorgio Valla nella sua grande enciclopedia, il *De expetendis et fugiendis rebus* uscita (postuma) nel 1501. Nel 1567 Melantone formula, contro la tesi dei mondi abitati, una serie di obiezioni fisiche e teologiche che verranno innumerevoli volte riprese, con maggiore o minore forza polemica, negli ambienti protestanti e in quelli cattolici. Nel 1634 vede la luce il *Somnium seu opus posthumum de astronomia lunari* di Keplero. Esso segna il passaggio dalla letteratura «fantastica» sulla Luna (ispirata a Luciano e all'Ariosto) ad una letteratura «fantastico-scientifica». Fonte per tre secoli (fino a Jules Verne e a Herbert George Wells) di innumerevoli testi di viaggi lunari, l'opera è piena di velate allusioni autobiografiche e di riferimenti alle tragiche vicende dell'avventurosa vita del suo autore. Il *Somnium* non è il frutto di una breve parentesi di riposo letterario: nato da un progetto che risale ad una perduta dissertazione giovanile del 1593, fu composto nel 1609 e poi arricchito di numerosissime (e talora assai lunghe) note fra il 1622 e il 1630 (Rosen, in Kepler 1967, XX). Il viaggio descritto da Keplero è una singolare mescolanza di fantasia e di realismo. Gli abitanti della Luna hanno dimensioni enormi e «natura serpentina». Hanno vita brevissima e si crogiolano al tremendo calore del Sole per poi rifugiarsi in fredde caverne e in crepacci. Nella descrizione del mondo fisico cessa la fantasia e ci troviamo all'interno di quell'universo che è stato rivelato dal telescopio (Nicolson 1960, 45): «A voi abitanti della Terra la nostra Luna, quando sorge piena e avanza sopra le case più lontane, sembra che assomigli al cerchio di una botte, e quando si alza in mezzo al cielo, sembra l'immagine di un volto umano. Per i subvolvani invece la loro Volva appare sempre in mezzo al cielo, grande poco meno del quadruplo del

diametro della nostra Luna, così che paragonando i due dischi la loro Volva è quindici volte più grande della nostra Luna... Per gli abitanti della Luna è evidente che la nostra Terra, che è la loro Volva, ruoti, ma che la loro Luna è immobile. Se si afferma che i sensi selenici della mia popolazione lunare si ingannano, con egual diritto rispondono che i sensi terrestri degli abitanti della Terra sono privi di ragione» (Kepler 1972, 6-7, 34).

Quattro anni dopo la pubblicazione del *Somnium*, nel 1638, John Wilkins (1614-1672) pubblicava uno dei libri più importanti di «scienza popolare» del secolo XVII: la *Discovery of a new world, or a discourse tending to prove that it is probable there may be another habitable world in the Moon* che ebbe diffusione larghissima e che sarà letteralmente saccheggiato da Fontenelle. Difendendo la sua ipotesi, Wilkins si richiamava all'incredulità che aveva accompagnato il progetto di Colombo, alla tradizionale derisione delle verità nuove, al dogmatismo delle opinioni popolari e alla cecità di quegli accademici che avevano per secoli negato l'esistenza degli antipodi. Wilkins si rende conto con chiarezza delle difficoltà di tipo teologico presenti nell'ipotesi dei mondi abitati. Quell'affermazione è ritenuta eretica dai tempi più antichi: se i mondi sono della stessa specie, Dio non è «provvidente» dato che nessuno dei mondi ha perfezione maggiore di un altro; se sono di specie diversa, nessuno può essere chiamato «mondo» o «universo» perché privo di universale perfezione. È molto significativo che fra gli argomenti più largamente usati *contro* il copernicanesimo e contro la tesi di una pluralità di mondi, Wilkins faccia riferimento alla tradizionale tesi «diabolocentrica», alla «infima natura della nostra Terra, che consta di una materia più sporca e più vile di quella di qualunque altra parte dell'universo e che deve perciò essere situata al centro, dato che questo è il luogo peggiore e più remoto dai puri, incorruttibili corpi che sono i cieli» (1638, 68).

Il copernicanesimo fu osteggiato *anche* perché assegnava all'uomo una dimora troppo elevata trasportandolo in luoghi non dissimili da quelli dei cieli immutabili e immortali. A questo tipo di atteggiamento — vale la pena di ricordarlo — faceva riferimento Galilei: «Quanto alla Terra, noi cerchiamo di nobilitarla e perfezionarla, mentre proccuriamo di farla simile a i corpi celesti e in certo modo metterla quasi in cielo, di dove i vostri filosofi l'hanno bandita» (*Opere*, VII, 62). Se era la sola sfera della corruzione, la Terra era comunque la sola sfera della generazione. Solo sulla Terra (nella visione tradizionale) nascevano nuove anime e solo su di essa era in gioco l'attuazione del disegno divino (Lovejoy 1966, 109). Dalla tesi della pluralità dei mondi abitati ermergevano domande inquietanti: qual è il senso della vicenda della caduta e della redenzione, del peccato originale e del sacrificio di Cristo, se la Terra, che è la scena ove si svolge questo grande dramma, è solo uno fra i molti mondi? Se ci sono più mondi e molti di essi sono abitati,

il Salvatore avrà redento anche quei mondi? Se anche i cieli sono soggetti al mutamento come potranno mai essere la sede di Dio?

Wilkins citava, come una fonte autorevole, anche le pagine sui mondi abitati contenute nella *Apologia pro Galilaeo* (1622) di Tommaso Campanella. Del 1646 è il *Democritus platonissans, or an essay upon the infinity of worlds* di Henry More. Nell'*Almagestum novum* (1651), che è uno dei testi più noti di selenografia dell'epoca, l'astronomo bolognese Giambattista Riccioli (1598-1671), seguace di Tycho Brahe e difensore dell'ortodossia, si richiamava ad Aristotele, a Ficino, a Keplero polemizzando contro la dottrina dei mondi abitati. Tra la fine degli anni Trenta e quella degli anni Sessanta compaiono una serie di testi nei quali il tema (che oggi chiameremmo «fantascientifico») dei viaggi sulla Luna e negli spazi celesti si intrecciava con considerazioni filosofiche, morali, astronomiche: *The man in the moon* (1638) di Francis Godwin, la *Description of a new world* (1666) di Margaret Cavendish.

A distanza di un anno l'uno dall'altro uscivano in Francia la *Histoire comique des états et empires de la Lune* (1656) di Cyrano de Bergerac (Hector Savinien, de, 1619-1655) e il *Discours nouveau prouvant que les astres sont des terres habitées* (1657) di Pierre Borel. Cyrano è uno degli esponenti più noti del pensiero libertino: è seguace della dottrina di un universo organico e vivente, si richiama a Campanella, Gassendi, La Mothe le Vayer, rimescola assieme temi attinti al platonismo ermetico e alla Cabala, all'atomismo di Democrito e di Epicuro, alla tradizione dell'averroismo, alla nuova cosmologia di Copernico, Galilei, Keplero. Le stelle fisse sono altrettanti Soli e da ciò si può concludere che il mondo è infinito «perché è verosimile che gli abitatori di una stella fissa scoprano ancora, al di sopra di se stessi, altre stelle fisse che non siamo in grado di scorgere da qui e che ciò si ripeta all'infinito». Come chi si trova in un'imbarcazione crede che la riva cammini, così gli uomini hanno creduto che fosse il cielo a girare attorno alla Terra. A questo errore dei sensi va aggiunto «l'orgoglio insopportabile dell'uomo il quale si persuade che la natura non è stata fatta che per lui, come se fosse verosimile che il Sole fosse stato acceso solo per far maturare le sue nespole e crescere i suoi cavoli». Borel vede nelle scoperte galileiane la prova non solo della verità del sistema copernicano, ma della validità delle ipotesi sui mondi abitati. Il suo testo (come quello letterariamente molto più seducente di Cyrano) non contiene dottrine originali, ma presenta, riuniti assieme i termini di una discussione che è costituita da un complesso intreccio di elementi attinti a differenti tradizioni e campi del sapere. Il libro di Borel, dedicato a Kenelm Digby si chiude con una lunghissima citazione di Palingenio Stellato. I nomi che ricorrono con maggior frequenza sono quelli di Copernico, Keplero, Campanella. Bruno, mai nominato, è continuamente presente e la

visione del mondo di Lucrezio (il testo è costellato di citazioni dal *De rerum natura*) fa da sfondo alle riflessioni. Ma il più amato dei maestri è Montaigne, che ci ha insegnato, come Socrate, a rifiutare le certezze e a dubitare. Alla metà del secolo, in un'epoca di radicali mutamenti, i suoi insegnamenti appaiono a Borel particolarmente attuali: «Ramo ha rovesciato la filosofia di Aristotele, Copernico l'astronomia di Tolomeo, Paracelso la medicina di Galeno; in tal modo, ciascuno avendo i suoi seguaci, non sappiamo a chi credere» (1657, 3). I presupposti da cui muove Borel sono quelli stessi di Bruno: «Ci si oppone che, essendovi un solo principio o primo motore, un solo Dio e una sola prima causa e dovendo il mondo corrispondere al suo Archetipo, deve esserci un solo mondo. Ma noi abbiamo mostrato il contrario: Dio essendo infinito, i mondi devono essere infiniti. Se non ci fossero più mondi nell'universo, Dio non potrebbe agire con tutta la sua potenza e libertà... Se Dio, avendo potuto creare più mondi non lo avesse fatto, la sua potenza potrebbe esser detta in qualche modo oziosa» (*Ibid.*, 37, 58).

Non va dimenticato, di fronte a questi testi, che alla metà del secolo il copernicanesimo suscita ancora forti resistenze e che illuminati contemporanei come Roberval e Pascal e Giandomenico Cassini manifestano incertezze profonde. Altri, meno illuminati, come il gesuita Honoré Fabri, difendevano — i *Dialogi physici* sono del 1666 — il geocentrismo. Diversa è la situazione degli ultimi decenni del secolo. I celebri scritti di Fontenelle (Bernard le Bovier, de, 1657-1757) e di Christiaan Huygens (1629-1695) costituiscono solo l'esito di una discussione che si era andata svolgendo per quasi due secoli. Gli *Entretiens sur la pluralité des mondes* (1686) nei cento anni di vita del suo autore ebbero 31 edizioni. Accanto alla teoria cartesiana dei vortici resero familiare a un numero assai grande di lettori le tesi della infinità dell'universo e di una pluralità di mondi abitati. Le scoperte microscopiche vengono utilizzate da Fontenelle a sostegno della tesi della vita diffusa per tutto l'universo: «si sono trovati in alcune specie di pietre molto dure, piccoli vermi alloggiati in vuoti impercettibili che si nutrivano soltanto con la sostanza della pietra che rodevano... Anche se la Luna non fosse che un ammasso di rocce, la farei rodere dai suoi abitanti piuttosto che non mettercene alcuno». In un universo infinito e infinitamente popolato la Marchesa alla quale il testo si rivolge esprime il suo smarrimento. Di fronte a quel turbamento e a quello spavento per l'infinito, il precettore esprime uno stato d'animo opposto: l'infinito lo mette a suo agio, «se il cielo fosse solo questa volta azzurra alla quale fossero inchiodate le stelle, l'universo mi sembrerebbe piccolo e mi sentirei come oppresso... L'universo ha ora un'altra magnificenza, la natura, costruendolo non ha risparmiato nulla...».

5. *Il* Cosmotheoros *di Huygens.*

Il grande Huygens morì nel 1695 lasciando inedito il manoscritto del *Cosmotheoros sive de terris coelestis eorumque ornatu conjecturae* che verrà pubblicato nel 1698. Né Cusano né Bruno né Fontenelle, secondo Huygens, hanno svolto una seria ricerca sugli abitanti degli altri mondi. E invece le vie che conducono alla conoscenza di cose tanto lontane non sono sbarrate e v'è materia per una serie di congetture verosimili. Ad esse non devono essere posti ostacoli per due ragioni: in primo luogo perché se avessimo accettato l'imposizione di limiti alla curiosità umana, non conosceremmo ancora né la forma della Terra né l'esistenza del continente americano; in secondo luogo perché la ricerca di teorie verisimili costituisce l'essenza stessa della fisica (*Oeuvres*, XXI, 683, 687, 689).

Chi assistesse all'anatomia di un cane non esiterebbe ad affermare l'esistenza di organi simili in un bue o in un porco. Allo stesso modo, conoscendo la Terra, è possibile far congetture sugli altri pianeti. La gravità non esiste certo solo sulla Terra. Perché la vita vegetale e animale dovrebbe esistere solo su di essa? È vero che la natura cerca la varietà e che attraverso la varietà si manifesta l'esistenza del Creatore, ma è anche vero che le piante e gli animali americani hanno una somiglianza di struttura con le piante e gli animali europei. Le differenze nella vita presente sui pianeti dipende dalla loro distanza dal Sole, «ma si daranno differenze di materia piuttosto che di forma» (*Ibid.*, 699, 701, 703). Gli ammirevoli modi della riproduzione delle piante «non possono essere stati inventati solo per la nostra Terra». Non è detto che gli abitanti degli altri pianeti siano simili a noi, ma essi sono certo strutturalmente analoghi a noi: saranno dotati anch'essi di una ragione e di valori simili ai nostri, avranno occhi, mani, scrittura, società, geometria, musica (*Ibid.*, 707, 717, 719-751).

Proprio perché crede nel valore delle congetture verosimili, Huygens respinge come del tutto stravaganti le affermazioni «vuote di senso e poco ragionevoli» contenute nell'*Iter ecstaticum* (1656) del padre Athanasius Kircher (1602-1680). Prima dell'invenzione del telescopio la tesi che il Sole sia una delle stelle fisse poteva apparire in disaccordo con la dottrina di Copernico. Oggi, «tutti coloro che abbracciano il sistema copernicano» ritengono che le stelle non siano collocate sulla superficie di una stessa sfera e pensano «che esse siano disseminate per i vasti spazi del cielo e che la stessa distanza che intercorre fra la Terra o il Sole e le stelle più vicine intercorra anche fra queste e le successive, e da queste ad altre ancora, in una progressione continua» (*Ibid.*, 809).

Le critiche rivolte da Huygens a Keplero relativamente a questo problema presentano elementi di grande interesse. Keplero, scrive Huygens,

era di un altro avviso. Pur credendo che le stelle siano disseminate nella profondità del cielo, riteneva che il Sole fosse collocato al centro di uno spazio più grande, al di sopra del quale iniziava un cielo disseminato di stelle. Pensava che, se le cose stessero diversamente, vedremmo solo poche stelle ed assai diverse per grandezza. Infatti, ragionava Keplero, dato che le stelle più grandi ci appaiono così piccole che possiamo a stento misurarle, e dato che quelle che sono due o tre volte più distanti ci appaiono necessariamente (supponendo le grandezze uguali) due o tre volte più piccole, si giungerebbe presto a stelle inosservabili e ne risulterebbero due cose: che dovremmo vedere poche stelle e che esse sarebbero di differente grandezza. Al contrario, ne vediamo molte e non molto diverse per grandezza. Il ragionamento di Keplero, afferma Huygens, è sbagliato: egli non ha tenuto conto che è proprio della natura del fuoco e della fiamma di essere visibili a distanze dalle quali altri oggetti non sono osservabili. Nelle strade delle nostre città si possono contare venti o più lanterne anche se esse sono collocate a un centinaio di piedi l'una dall'altra e anche se la fiamma della ventesima è vista sotto un angolo di appena sei secondi. Nulla di strano, quindi, se ad occhio nudo vediamo mille o duemila stelle e se ne vediamo venti volte di più con un telescopio.

Ma l'errore di Keplero ha, agli occhi di Huygens, una radice più profonda. Egli desiderava (*cupiebat*) «considerare il Sole come un oggetto eminente sulle altre stelle, unico in natura ad essere provvisto di un sistema di pianeti e collocato al centro dell'universo». Di ciò egli aveva bisogno per aver conferma del suo «mistero cosmografico» per il quale le distanze dei pianeti dal Sole dovevano corrispondere ai diametri delle sfere inscritte e circoscritte ai poliedri di Euclide. Per questo, bisognava «che ci fosse nell'universo un solo ed unico coro di pianeti attorno ad un Sole considerato unico rappresentante della sua specie» (*Ibid.*, 811). Tutto questo mistero è nato dalla filosofia di Pitagora e di Platone: le proporzioni non sono conformi alla realtà e gli argomenti addotti a favore della sfericità della superficie esterna dell'universo sono assai deboli. La conclusione di Keplero secondo la quale la distanza del Sole dalla superficie concava della sfera delle stelle fisse è centomila volte il diametro della Terra è inoltre fondata sulla stravagante ragione che il diametro dell'orbita di Saturno sta a quello della superficie inferiore della sfera delle fisse come il diametro del Sole sta a quello dell'orbita di Saturno (*Ibid.*, 813).

Alla stranezza delle idee del grande fondatore dell'astronomia, Huygens contrappone la tesi «bruniana» di una identità di natura fra il Sole e le stelle: «Non si deve esitare ad ammettere, con i principali filosofi del nostro tempo, che il Sole e le stelle hanno una stessa natura. Ne risulta un'immagine dell'universo più grandiosa di quella fin qui tramandata. Chi ci impedisce di

pensare che ciascuna di queste stelle o Soli abbia dei pianeti attorno a sé, a loro volta provvisti di lune? ...Se ci collochiamo col pensiero nelle regioni celesti, in una posizione non meno lontana dal Sole che dalle stelle fisse, non noteremmo fra quello e queste differenza alcuna» (*Ibid.*, 813).

Le empie congetture dei seguaci di Lucrezio, di Cusano, di Bruno sulla molteplicità dei sistemi solari e sulla vita diffusa e onnipresente nell'universo trovavano conferma autorevole nello scritto di uno dei più famosi scienziati del secolo, scopritore degli anelli di Saturno e teorico della nuova dinamica. Nel 1660, a Parigi, Huygens aveva incontrato Pascal ed era stato presentato a Luigi XIV. Membro della Royal Society, era anche diventato uno dei membri più attivi dell'*Académie des sciences*. Il ministro Colbert gli aveva offerto, a Parigi, un appartamento, un laboratorio, un'elevata pensione. In quella città Huygens non aveva frequentato solo gli ambienti abituali a Pascal e a Pierre Daniel Huet, ma anche il circolo, assai poco ortodosso, dei fratelli Charles e Nicolas Perrault. Aveva avuto rapporti con atei e miscredenti dichiarati come Jean Chapelain e Adrien Auzot. Si era avvicinato ai testi degli epicurei, dei libertini e a quelli di Spinoza. Pensava che l'anima fosse mortale e che l'affermazione secondo la quale tutte le cose sono state create per l'uomo non può certo voler dire che i corpi ingenti delle stelle (che solo in parte vediamo e che mai avremmo comunque visto senza l'aiuto del telescopio) siano stati creati per l'utilità dell'uomo e per essere da lui contemplati (*Ibid.*, 687).

Collocarsi mentalmente in un punto dell'universo equidistante dal Sole e dalle stelle fisse più vicine e da quel punto considerare il Sole e la Terra (divenuta invisibile): questo tipo di «esperimento mentale» non appartiene alla stessa famiglia degli esperimenti mentali in uso nella filosofia naturale di Galilei. Presuppone il distacco da un punto di vista terrestre o eliocentrico nella considerazione del cosmo, una sorta di relativismo cosmologico che si fa strada negli anni stessi della nascita del relativismo culturale. Ciò traspare con chiarezza dal testo stesso di Huygens: «Conviene che ci consideriamo come posti al di fuori della Terra e capaci di guardarla da lontano. Possiamo allora chiederci se è vero che la natura ha conferito ad essa sola tutti i suoi ornamenti. In quel modo potremo capire meglio cosa è la Terra e come dobbiamo considerarla. Allo stesso modo, coloro che compiono grandi viaggi sono giudici migliori delle cose della loro patria rispetto a coloro che non l'hanno lasciata mai» (*Ibid.*, 689).

6. *La fine della concezione «terrestre» dell'universo.*

Si era andata lentamente formando un'immagine «lucreziana» dell'universo che costituirà per almeno un secolo (fino al Barone d'Holbach e oltre) la grande alternativa al deismo e all'immagine del mondo costruita da

Newton e dai newtoniani. In essa non c'era più molto spazio per la celebrazione di un cosmo ordinato e perfetto, costruito per il signore del mondo, che lascia trasparire, a edificazione dell'uomo, la trama di una infinita sapienza. Nella *Telluris theoria sacra* (1681) di Thomas Burnet (1635 ca.-1715) è presente un'immagine pessimistica e tragica del mondo. Esso non è in alcun modo costruito in funzione dell'uomo, non può essere concepito come una sorta di «appendice» della Terra o in funzione di essa. La posizione «relativistica» di Cusano e di Bruno, per la quale la Luna è cielo a noi, così come noi siamo cielo alla Luna e astro e cielo per le altre stelle, veniva risolta nella visione di un universo in rovina, destinato alla consunzione e alla morte, entro il quale la Terra è «una oscura e sordida particella» sospesa nella profondità senza più limiti dei cieli. Le stelle fisse sono corpi ignei e non aderiscono tutte alla stessa superficie, alcune sono più remote di altre dalla Terra e «non esiste pertanto alcun *umbilicum* a tutte comune». Questi temi si congiungevano, nelle pagine di Burnet, con i dubbi sulla possibilità di racchiudere l'intera storia del mondo nel troppo breve spazio concesso dall'ortodossia. L'ipotesi di una lenta formazione dell'universo faceva sì che la Terra, da tempo detronizzata dalla sua posizione di centro, diventasse anche il prodotto, non primogenito né eccezionale, di un lento e faticoso processo temporale, interrotto da catastrofi e da innumerevoli rovine di mondi. La maggioranza degli uomini, notava Burnet, continua tuttavia a ritenere l'intera natura e l'intero universo *pro quadam orbis nostri aut telluris appendice*.

Bisogna — aveva scritto Pierre Borel più di vent'anni prima — che gli uomini imparino a non essere come quei contadini che non hanno mai visto una città e continuano a ritenere per tutta la vita che non possa esservi nulla di più grande o più bello del loro piccolo villaggio (Borel 1656, 14, 32). L'intera Terra si configurava ora come soltanto una provincia o un villaggio dell'universo. Non diversamente da come era avvenuto, per il Mediterraneo e per l'Occidente, di fronte alle scoperte geografiche e ai viaggi in paesi sconosciuti e presso popoli lontani. Nel *Mundus alter et idem* (1607), Joseph Hall (che scriveva firmandosi Britannicus Mercurius) aveva scritto: «Chi avrebbe mai sospettato tanta intelligenza e tanta perizia nei Cinesi? un così grande numero di arti? una così vasta e varia scienza di tutte le cose? Mentre noi continuiamo a credere che tutte le Muse risiedano in quell'abituro che è l'Occidente, essi sorridono. E non senza ragione».

Le lunghe dispute sull'infinità dell'universo e sulla pluralità e abitabilità dei mondi contribuirono — entro un più vasto contesto culturale — non solo a mettere in crisi ogni concezione antropocentrica e «terrestre» dell'universo, ma anche a svuotare di senso il tradizionale discorso degli Umanisti sulla nobiltà e dignità dell'uomo. Per acquistare un significato non mera-

mente retorico e letterario, esso doveva ora essere diversamente formulato, venir inserito in un più complicato contesto, assumere un nuovo significato. Era nata un'immagine nuova della natura e del posto dell'uomo nella natura. Essa, così come la nozione di un universo infinito, poteva essere variamente utilizzata: poteva servire come fondamento alla religiosità profonda di Pascal come al determinismo dei materialisti del Settecento.

È comunque certo che i grandi protagonisti della storia che condusse dal mondo chiuso all'universo infinito — Bruno e Wilkins, Borel e Burnet, Cyrano e Fontenelle — utilizzarono liberamente, a sostegno della loro visione dell'universo, i risultati più importanti e sconvolgenti ai quali aveva dato luogo il lavoro dei grandi astronomi del Seicento. Nel far questo effettuarono (come oggi si direbbe) non sempre legittime né sempre caute estrapolazioni. Si fondarono su affrettate analogie. Ma anche le loro «fantasie» e i loro procedimenti di tipo analogico contribuirono non poco a mutare il corso della storia delle idee ed anche il cammino della storia della scienza. Il *Somnium* di Keplero e il *Cosmotheoros* di Huygens stanno comunque a dimostrare che a quelle «fantasie» non furono indifferenti anche gli elaboratori di rigorosi teoremi.

BIBLIOGRAFIA

Testi

F. Bacon, *Works*, a cura di E.R. Ellis, J. Spedding, D.D. Heath, London, 1887-1892, 7 voll.
P. Borel, *Discours nouveau prouvant la pluralité des mondes*, Genève, 1657.
G. Bruno, *Opere italiane*, a cura di G. Gentile, Bari, Laterza, 1907.
T. Campanella, *Apologia di Galileo*, a cura di L. Firpo, Torino, UTET, 1968.
N. Copernico, *De revolutionibus orbium caelestium*, a cura di A. Koyré, Torino, Einaudi, 1975.
N. Cusano, *Opera omnia*, a cura di E. Hoffmann e R. Klibanski, Lipsiae, 1932.
G. Galilei, *Opere*, Firenze, Barbera, 1890-1909, 20 voll.
Ch. Huygens, *Cosmotheoros, sive de terris coelestibus earumque ornatu conjecturae*, Hagae Comitorum, 1698.
Id., *Oeuvres complètes*, La Haye, 1888-1950, 22 voll.
J. Kepler, *Opera omnia*, a cura di C. Frisch, Frankfurt a.M., Heyder und Zimmer, 1858-1871.
Id., *Gesammelte Werke*, a cura di M. Caspar, München, Beck, 1937-1959, 18 voll.
Id., *Dissertatio e Narratio*, a cura di E. Pasoli e G. Tabarroni, Torino, Bottega d'Erasmo, 1972.
Id., *Somnium*, a cura di E. Rosen, Madison, The University of Wisconsin Press, 1967.
G.W. Leibniz, *Philosophische Schriften*, a cura di C.I. Gerhardt, Berlin, 1875-1890, 7 voll.
J. Wilkins, *Discovery of a new world*, London, 1638.

Studi

L. Erba, *L'incidenza della magia nell'opera di Cyrano de Bergerac*, Milano, 1960.
A. Koyré, *Dal mondo chiuso all'universo infinito*, Milano, Feltrinelli, 1970.

TH.S. KUHN, *La rivoluzione copernicana*, Torino, Einaudi, 1972.
A.O. LOVEJOY, *La grande catena dell'essere*, Milano, Feltrinelli, 1966.
M. NICOLSON, *Voyages to the Moon*, New York, Macmillan, 1960.
ID., *Science and imagination*, Ithaca, Cornell University Press, 1956.
ID., *Kepler, the* Somnium *and John Donne*, in «Journal of the History of Ideas», I, 1940, pp. 259-280.
P. ROSSI, *Nobilità dell'uomo e pluralità dei mondi*, in *Aspetti della rivoluzione scientifica*, Napoli, Morano, 1971, pp. 223-264.

XII. *Le origini della chimica moderna* (di Ferdinando Abbri)

1. *Gli oggetti della chimica.*

Dal punto di vista storico la chimica, come scienza della materia, appare simile ad una struttura piena di incongruenze. Questa struttura fu infatti edificata da correnti culturali diverse, spesso operanti in modo indipendente. La «chimica» possiede certo una sua storia relativa ai periodi che precedono l'opera di Boyle o di Lavoisier, ma per questi periodi occorre compiere molti sforzi per individuare gli specifici «problemi» che furono allora oggetto di analisi. In altre parole: i problemi di base della chimica pre-moderna non hanno ai nostri occhi la stessa «familiarità» che caratterizza invece i problemi dell'astronomia e della meccanica antiche e medioevali. Gli «oggetti» della chimica moderna si sono venuti costruendo faticosamente nel tempo: la teorizzazione di un approccio al mondo della materia secondo specifiche modalità chimiche è frutto di un processo lento, contraddittorio, fatto di svolte e di ritorni che, iniziato nel Cinquecento, è destinato a delinearsi compiutamente solo alla fine del Settecento.

È stato scritto giustamente che la chimica come scienza specifica è un *prodotto* della rivoluzione scientifica (Hall [1954] 1976, 282). Essa non sorse da una tradizione precisa e consolidata, né può venir considerata un prodotto diretto o una «conseguenza» dell'alchimia. La tradizione alchemica lasciò una ricca eredità di esperienze e di strumenti all'indagine chimica, ma quest'ultima si inserì in quadri concettuali molto diversi: le teorie e i processi alchemici costituivano, per definizione, il patrimonio esclusivo di pochi

iniziati alla divina arte di fabbricare l'oro, mentre le ricerche chimiche dovevano contribuire al progresso generale della conoscenza della materia e al generale miglioramento delle condizioni di vita.

A partire dal Cinquecento le teorie chimiche vennero emergendo da diverse radici, da diversi e spesso contraddittori campi di ricerca. Considerazioni di tipo chimico si ritrovano nelle ricerche mediche, farmacologiche, mineralogiche, filosofiche, botaniche, alchemiche e nelle pratiche degli artigiani. Il chimico attuale trova i suoi progenitori in una eclettica popolazione costituita da maghi, alchimisti, paracelsiani, peripatetici, iatrochimici e da altri personaggi stravaganti. Può essere fonte di imbarazzo avere simili antenati, ma è indubbio che le origini della chimica moderna vanno ricercate proprio nei loro scritti.

2. *La filosofia chimica.*

Alla morte di Paracelso (avvenuta nel 1541) niente lasciava pensare che l'irrequieto medico svizzero, che aveva scandalizzato la classe medica ufficiale di mezza Europa con il suo atteggiamento anti-tradizionalista, aveva in realtà messo in moto un processo rivoluzionario destinato a mutare il quadro della medicina e delle scienze naturali. La storia della scienza contemporanea ha profondamente modificato le tradizionali ricostruzioni della scienza del Seicento. Gli studi sull'ermetismo rinascimentale hanno infatti delineato un quadro assai più complesso delle origini della scienza moderna. La teorizzazione di una nuova filosofia della natura in opposizione alla cultura ufficiale delle scuole non è presente solo nelle classiche opere di Bacone, Galilei, Gassendi, Descartes ma anche nei testi appartenenti alla tradizione ermetico-paracelsiana. Questa tradizione ebbe un'influenza limitata nel caso della fisica e dell'astronomia, ma costituì uno stimolo essenziale per l'elaborazione delle metodologie osservative usate dalle scienze empiriche. Le discussioni sulla validità dell'analogia tra macrocosmo e microcosmo, della magia naturale, dell'astrologia e dell'alchimia ebbero una rilevanza non inferiore alle discussioni sul sistema eliocentrico. La rivoluzione scientifica — ha scritto giustamente Allen G. Debus — non deve essere soltanto considerata come l'avvento di una moderna filosofia meccanica della natura (Debus 1977, I, 2). Nella scienza del Seicento è presente anche una *filosofia chimica* di origine ermetica che trovò la sua matrice teorica nelle opere di Paracelso. Queste ultime costituirono contemporaneamente: 1) la struttura teorica della filosofia chimica; 2) una visione «chimica» unitaria dell'intero Cosmo; 3) la base per uno sviluppo delle indagini chimiche.

Durante la sua movimentata esistenza Paracelso aveva pubblicato solo una minima parte dei suoi voluminosi scritti. Dopo la sua morte un vero e

proprio diluvio di testi inediti investì l'Europa. Tra il 1575 e il 1658 molteplici edizioni, sia nell'originale versione tedesca, sia in traduzione latina, si susseguirono con grande frequenza al fine di soddisfare le richieste dei medici che abbandonavano, in numero sempre più consistente, le tradizionali dottrine aristotelico-galeniche. La *filosofia chimica* fu il risultato dell'opera di edizione, di commento e di esposizione dei primi paracelsiani. Un ruolo di primo piano nella diffusione delle idee di Paracelso venne svolto da Gerard Dorn, Petrus Severinus e Oswald Croll.

Gerard Dorn (? -1584) effettuò la traduzione di alcuni scritti di Paracelso, illustrò i rimedi paracelsiani e compilò un «dizionario» per spiegare l'oscura terminologia paracelsiana. Nella *Clavis totius philosophiae chymisticae* (1567) fornì la seguente definizione: «La Filosofia chimica insegna ad investigare le forme nascoste delle cose secondo la verità e non l'apparenza delle cose. I suoi seguaci veri seguono due strade: l'opinione e l'esperimento». Dorn illustra poi i concetti di natura, forma, materia («la materia è per noi la regione degli elementi») e i processi di corruzione e di generazione delle cose (Dorn [1567], 1659, 195). Nel capitolo sulla corruzione chimica chiarisce che il fine della chimica consiste nel risolvere le cose composte in quelle parti che, in origine, le hanno costituite. Il chimico deve cioè ottenere, mediante separazioni, i *princìpi* delle cose stesse.

La visione della materia di Dorn risente tuttavia della tradizione aristotelica. Nel *Chymisticum artificium naturae* (1568) Dorn criticò la dottrina peripatetica della generazione e della corruzione in quanto contraddittoria, differenziò le corruzioni e le generazioni naturali da quelle artificiali, ma le forme sostanziali costituiscono un aspetto essenziale della sua teoria. Dorn ammetteva ad esempio due tipi di corruzione: una *trasmutazione*, durante la quale la «specie» di una sostanza si conserva, e una *trasformazione*, durante la quale tale specie non si conserva dato che essa dipende dalla forma.

Le idee di Dorn sugli elementi o principi sono contraddittorie (ammette fuoco, aria, acqua e terra come elementi, ma questi ultimi sono diversi da quelli ottenibili mediante corruzione artificiale). Lo scopo della chimica consisteva per lui solo nell'individuare la «natura» caratteristica di una sostanza composta. Dorn era tuttavia un rigido seguace di Paracelso sul piano filosofico generale. Si interessò infatti attivamente alla numerologia mistica; nel 1577 stampò l'*Anatomia viva Paracelsi*, nella quale proponeva un principio rigidamente paracelsiano, cioè la teoria delle corrispondenze o simpatie tra l'oggetto della cura e il metodo di cura; nel *Liber de naturae luce physica, ex Genesi desumpta* (1583) presentò un commentario dei primi sei giorni della Genesi basato sul *Corpus ermetico* e sulla *Philosophia ad Athenienses* di Paracelso nel quale interpretava l'origine e la struttura del mondo in chiave chimica.

In sintesi si può affermare che in Dorn si ritrovano, allo stesso tempo, un'entusiastica adesione alla filosofia di Paracelso e la difficoltà di enucleare da tale filosofia una coerente teoria chimica dei principi dei corpi. L'accettazione dei *tria prima* (sale, zolfo, mercurio) come strumenti di spiegazione dei mutamenti della materia fu frutto di un lento processo di chiarimento delle contraddittorie concezioni di Paracelso. Solo agli inizi del Seicento i cosiddetti «tre princípi» divennero la guida teorica per le analisi dei chimico-medici.

Tra i motivi che portarono molti medici alla conversione al paracelsismo non va sottovalutata la provata efficacia delle nuove medicine di origine minerale. I «chimici» della fine del Cinquecento svilupparono in maniera decisiva l'analisi delle sostanze, anche se dovettero superare gli ostacoli costituiti dalla mancanza di una teoria utile per guidare la pratica analitica e dalla tendenza a trascurare i residui delle distillazioni.

La necessità di giungere ad una chiara teoria della materia è particolarmente evidente nell'*Idea medicinae philosophicae* (1571) del danese Petrus Severinus (Sørenson, 1542-1602, medico del re di Danimarca). Questo testo rappresenta una difesa delle dottrine paracelsiane contro la medicina tradizionale e contro l'approccio «logico» di Galeno. Severino credeva al parallelismo tra macrocosmo e microcosmo, alla necessità di un'affinità tra cura e oggetto della cura. Ammetteva a scopi pratici i tre principi, ma accettava anche gli elementi aristotelici. La sua immagine della materia era tuttavia vitalista: credeva all'esistenza di un principio aereo e vitale e di *astra* (le forze degli elementi) che, uniti agli elementi, formano i *semina* che si ritrovano in tutte le parti di una sostanza. I *semina* astrali erano i responsabili della vita e l'oggetto principale dell'attenzione del naturalista.

Nel 1609 apparve la *Basilica chymica* di Oswald Croll (ca. 1560-1609), un testo che conobbe un'ampia diffusione (tra il 1609 e il 1658 venne pubblicata diciotto volte sia nell'originale testo latino, sia in traduzione nelle principali lingue europee) ed esercitò una notevole influenza. La *Basilica* fornisce un quadro esemplare dei principali temi oggetto di discussione da parte dei medici e dei chimici del primo Seicento. Si compone di tre parti: una *Praefatio admonitoria* (che descrive il sistema paracelsiano di filosofia naturale); un *Tractatus de signaturis rerum internis* sulla ricerca delle virtù interne dei corpi (le segnature impresse dal Creatore) e un'ampia parte pratica (la *Basilica* vera e propria) che costituisce un manuale di chimica medica. Croll ammetteva la divisione della materia nei tre principi paracelsiani (sale, zolfo, mercurio). Per lui i *tria prima* erano visibili e dimostrabili attraverso l'esperienza, ma non erano dotati della sola determinazione della materialità. I principi conferivano qualità ai corpi ed erano, allo stesso tempo, entità spirituali, matrici e ricettacoli di tutte le sostanze del creato. La *Basilica*

si presenta però anche come un manuale di chimica pratica (Croll teneva nettamente distinte la teoria e la pratica) che possiede aspetti di indubbia novità. Croll fu tra l'altro il primo chimico ad interessarsi concretamente dei prodotti reali di una reazione. Tentò infatti di ottenere medicine dalla dissoluzione di vari metalli mediante l'uso degli acidi forti. Croll ammetteva l'esistenza di quattro sali (salnitro, vitriolo, sale comune e «tartaro») e distingueva nettamente quattro acidi: solforico, nitrico, idrocloridrico e acqua regia.

Le edizioni degli scritti di Paracelso, i testi di Dorn, Severinus e Croll (e di altri medici convertiti al paracelsismo) segnarono l'atto di nascita di una visione alternativa della medicina e dell'alchimia che non tardò a sollevare l'opposizione delle Facoltà mediche e teologiche. Un vero e proprio confronto si verificò a Parigi nel 1603. Vari testi di autori francesi ispirati alle dottrine paracelsiane avevano fatto la loro comparsa alla fine del Cinquecento, ma il confronto fu provocato soprattutto da Joseph Duchesne (Quercetanus, ca. 1544-1609), che rivendicò decisamente la naturalità e la validità delle medicine di origine minerale (le medicine paracelsiane per eccellenza). Per Quercetanus le medicine «chimiche» non erano né violente né pericolose, ma pienamente conformi alla natura del corpo umano. L'arte spagirica o chimica costituiva una reale colonna della medicina. Quercetanus oppose al dogmatismo dei galenici lo sperimentalismo dei chimici: questi ultimi non seguivano i libri bensì la ragione e l'esperienza perché ricercavano le essenze interne dei corpi. Il medico francese condivideva molte concezioni dei filosofi chimici, ma cercò di dissociarsi dal paracelsismo più dottrinario e più ideologico e presentò perciò l'arte spagirica come una vera e propria arte pratica al servizio della medicina. Nelle sue analisi dei corpi si servì principalmente dei *tria prima*, ma non rifiutò i quattro elementi; ammetteva in effetti una corrispondenza tra sale e terra, zolfo e fuoco, mercurio e acqua aria.

Tra i medici che rifiutarono invece apertamente le teorie paracelsiane vanno ricordati lo svizzero Thomas Erastus (Liebler, ca. 1524-1583) e il tedesco Andreas Libavius (Libau, ca. 1540-1616). Nelle *Disputationes de medicina nova Paracelsi* (1572-74) Erastus, pur riconoscendo che Paracelso era un chimico abile, si oppose nettamente al suo sistema filosofico. La sua opposizione ha radici teologiche e mediche. Nella visione unitaria del Cosmo, nell'interpretazione della Creazione in termini di separazione chimica, nell'unificazione tra spirituale e corporeo Erastus vide la fondazione teorica non di un'arte ma della magia naturale. I tre principi di Paracelso erano per lui una innovazione mostruosa e «magica»: se sale, zolfo e mercurio venivano considerati sostanze materiali, allora non potevano essere *princìpi* perchè tutte le cose, come dimostravano le analisi di laboratorio, non

li contenevano. Se venivano considerati invece esseri spirituali, non potevano costituire la matrice dei quattro elementi perché la materia non poteva aver avuto origine da principi spirituali. Erastus rivendicò decisamente la validità degli elementi tradizionali di Aristotele.

Nella sua *Alchemia* (1597; un'edizione ampliata apparve nel 1606 con il titolo di *Alchymia*) Libavius definì l'alchimia un'arte divina che ha come scopo l'estrazione di essenze pure dalle sostanze miste. Attaccò il misticismo dei paracelsiani e privilegiò i procedimenti pratici di laboratorio. Il suo attacco si concentrò sull'accettazione della analogia tra macrocosmo e microcosmo dato che, a suo avviso, non poteva esistere un connubio tra mondo celeste e mondo terrestre. Secondo Libavius l'attività pratica dei paracelsiani non aveva alcun valore perchè non si fondava su una vera magia naturale ma su un insieme di negromanzia, astrologia e di commercio con gli spiriti.

L'*Alchemia* di Libavius non è un testo di ricette alternative rispetto a quelle paracelsiane, ma il risultato di un impressionante sfoggio di erudizione. Libavius volle fornire un commento di innumerevoli testi il cui significato venne chiarito anche grazie ad un'intensa attività sperimentale. La chimica si configura come un corpo plurisecolare di conoscenze che doveva essere sottoposto ad una rigida trattazione metodica. Al radicalismo ideologico della filosofia chimica, Libavius contrappose la rigida ortodossia di una chimica che indaga la natura e quest'ultima è vista non come uno specchio dell'uomo ma come una testimonianza, in sé muta, della bontà di Dio. Si deve tuttavia tener presente che il rigido approccio didattico-erudito adottato non impedì a Libavius di compiere, ad esempio, una esplorazione sistematica della reattività dell'acido nitrico, che lo portò ad isolare i nitrati di stagno e di piombo, e di analizzare vari acidi e sali (il nome di Libavius fu per molto tempo associato alla preparazione dello *spiritus fumans Libavii* o cloruro stannico).

Nonostante duri contrasti e serrati dibattiti (Libavius appoggiò la condanna dei paracelsiani da parte della Facoltà di medicina dell'università di Parigi) venne facendosi strada, nella cultura del primo Seicento, la tendenza a conciliare le diverse teorie «chimiche» che si fronteggiavano e ad inserire perciò parte della filosofia chimica nella struttura della scienza medica accademica. La distinzione tra rimedi tradizionali e rimedi spagirici scomparve alla metà del secolo: le diverse edizioni delle *Farmacopee*, a partire dal 1546 fino al 1684, testimoniano la progressiva accettazione dei preparati di origine minerale. Il *De chymicorum cum aristotelicis et galenicis consensu ac dissensu* (1619) del medico tedesco Daniel Sennert (1572-1637) costituisce il risultato di un lungo sforzo di integrazione tra filosofia paracelsiana e teorie galenico-aristoteliche. Il nome di Sennert è legato anche ad uno dei primi

tentativi di adottare una visione atomistica della materia. Ammetteva infatti l'esistenza di particelle piccolissime, denominate *minima*, e dimostrava la loro realtà fisica attraverso i fenomeni di vaporizzazione e di condensazione.

Agli inizi del Seicento la filosofia chimica conobbe una nuova sintesi grazie al medico e alchimista inglese Robert Fludd (1574-1637) e una profonda ristrutturazione che fu realizzata dal medico belga Jean Baptiste van Helmont (1579-1644).

Nelle opere di Fludd la chimica ermetica, mistica e paracelsiana divenne la struttura teorica fondamentale sulla base della quale veniva ricostruita e indagata tutta la realtà (materiale e spirituale). I manifesti programmatici (*Fama Fraternitatis* e *Confessio Fraternitatis*) del movimento dei Rosacroce, che reclamava una riforma radicale del sapere e sollecitava uno spirito missionario, ebbero un forte impatto su Fludd. Nel 1616 egli pubblicò una *Apologia* di questo movimento (che era stato attaccato da Libavius in varie opere) nella quale veniva proposto, in contrasto con quello delle scuole, un nuovo sapere basato sull'alchimia, sulla magia naturale, sulla medicina paracelsiana e sul pieno recupero dell'insegnamento mistico del pitagorismo (Fludd aveva orrore dell'approccio «accademico» alla matematica). Nel 1617 vedeva la luce il primo volume della sua storia del macrocosmo e del microcosmo (*Utriusque Cosmi maioris scilicet minoris, Metaphysica, Physica atque Technica Historia*) nel quale veniva fornita una dettagliata esposizione della nuova «scienza», ovvero di una filosofia chimica fondata sull'analogia tra i due mondi (universo e uomo), sulla radicale armonia del cosmo, sul misticismo numerologico e musicale dei pitagorici, su una spiegazione mistico-chimica della creazione. Per Fludd l'origine di tutte le cose risiedeva nell'oscuro Caos primigenio dal quale derivava la luce divina, quest'ultima, agendo sul Caos, produceva le acque che costituivano la materia passiva di tutte le cose. I tre elementi primari erano le tenebre, la luce e le acque e dalle acque emergevano gli elementi secondari. L'universo di Fludd è un tutto armonico (le sue armonie sono esemplificate dal monocordo che è diviso in regioni corrispondenti agli astri e ai quattro elementi aristotelici) che è pieno dello spirito divino, il quale, scendendo dal cielo, dà vita a tutte le cose. Fludd riteneva che questo spirito potesse essere isolato mediante analisi chimiche del grano. La sua immagine del cosmo prevede un mondo sublunare degli elementi che è separato dalle regioni celesti più basse che, a loro volta, sono separate dal mondo celeste superiore che si trova oltre la sfera delle stelle fisse. Dio regola e controlla l'universo e la natura, la quale è connessa all'uomo (simbolizzato da una scimmia perchè l'uomo riflette in maniera limitata la divinità).

La filosofia «mosaica» di Fludd, le sue concezioni medico-alchemiche sono molto complesse. Qui è sufficiente ricordare che egli propose una

«scienza» cristiana e mistica che fosse in grado di opporsi all'aristotelismo «empio» delle scuole. Le sue opere ebbero una vasta diffusione e provocarono vivaci controversie con Mersenne (che richiese anche l'appoggio del paracelsiano van Helmont), Keplero e Gassendi. Per aver chiari i termini di questi dibattiti basta considerare il diverso ruolo (al quale si è già fatto riferimento nel capitolo VI) assegnato alla matematica da Keplero e da Fludd. Per quest'ultimo i simboli matematici celavano misteri, armonie e proporzioni in conformità ad un piano cosmico definito: solo attraverso il recupero del misticismo dei pitagorici, cioè attraverso l'acquisizione dell'antica sapienza ermetica (alchemico-magica) e il rifiuto delle definizioni astratte dei matematici si poteva giungere a concepire le armonie universali e la struttura reale del mondo. Keplero considerava invece la sua immagine simbolico-matematica dell'universo come un'ipotesi fondata su premesse quantitative dimostrabili e suscettibile di variazioni in conseguenza di osservazioni e di calcoli aggiuntivi.

La filosofia chimica si presentò in una forma ben diversa, rispetto a quella assunta grazie a Fludd, nelle opere di Jean Baptiste van Helmont. Van Helmont condivideva l'esigenza paracelsiana e fluddiana di una nuova filosofia e di una nuova medicina che si opponessero all'interpretazione della natura in termini matematici in quanto empia e pagana. L'astrazione matematica poneva infatti limiti rigidi all'azione di Dio sulla natura. Questa posizione non implicava un disprezzo per le misurazioni quantitative (per l'uso della bilancia nella pratica chimica) alle quali van Helmont fece frequente ricorso. L'astrazione matematica era per lui una cristallizzazione inaccettabile di un universo che mostrava un continuo mutamento, una «vita» continua.

Nel 1621 van Helmont fu coinvolto in una controversia con i gesuiti intorno alla cura magnetica delle ferite. La condanna del suo trattato *De magnetica vulnerum curatione* da parte delle Facoltà di teologia e di medicina dell'Università di Lovanio lo indusse a non pubblicare più niente. I suoi trattati apparvero postumi (1648) in un volume dal titolo *Ortus medicinae* che esercitò un'influenza notevolissima su medici e filosofi. Van Helmont non era un rigido seguace di Paracelso. Rifiutò infatti le influenze delle stelle, le analogie e le corrispondenze e propose una nuova teoria della materia. Sulla base della Genesi accettò due soli elementi: acqua e aria. L'acqua era la base materiale, la matrice dei corpi, la quale, muovendosi circolarmente, rende attivi e distribuisce i *semina* delle cose. La terra era solo acqua trasmutata, mentre il fuoco era considerato uno strumento per effettuare le analisi delle sostanze. Ma esso non si limita a scomporre i corpi nei loro supposti elementi, provoca in realtà mutamenti nella loro struttura compositiva. I *tria prima* di Paracelso non erano veri principi, non erano pre-esistenti

nei corpi. Van Helmont negava la possibilità di una mistione originaria di principi o elementi chimici.

Il medico belga fu il primo ad utilizzare il termine *gas* per denotare gli spiriti aerei. Per rendersi conto del reale significato del concetto di gas di van Helmont conviene tener presente che esso era strettamente connesso ad una visione mistica e animistica della natura. Il gas ha un significato cosmologico: ogni essere, ogni singolo individuo è stato dotato da Dio di un piano specifico di vita, di forma e di funzioni. Il Gas è il vettore, il portatore spirituale del piano vitale specifico di ogni oggetto. Il Gas è acqua «segnata» da un seme particolare che si presenta perciò in forma volatile; esso non è *nel* corpo, bensì è *il* corpo in una forma diversa da quella originaria, nella sua forma più pura. La liberazione di un gas da un corpo è il segno che tale corpo è in procinto di convertirsi in altro, di trasmutarsi.

Agli inizi del Seicento la filosofia chimica di origine paracelsiana si era saldamente inserita nel panorama della cultura filosofico-scientifica. Non costituiva tuttavia una tradizione omogenea: ad essa si richiamavano sia filosofi-medici che ricercavano sistemi unitari del mondo basati sulla relazione macrocosmo-microcosmo, sia filosofi-medici che rifiutavano tale relazione e privilegiavano la chimica o spagirica come strumento essenziale per una radicale riforma della medicina. Grazie all'opera di questo secondo gruppo l'aspetto cosmologico della filosofia chimica venne progressivamente abbandonato e la chimica poté lentamente emergere dallo «strano mare» delle speculazioni paracelsiane per costituirsi come arte operativa e analitica. La trattatistica del Seicento mostra un innegabile debito verso Paracelso e i paracelsiani, ma essa realizzò un progressivo, articolato sganciamento dalle speculazioni di Paracelso o da quelle di Fludd. Prese vita, in tal modo, una iatrochimica o chimica medica che, pur non rinunciando a concetti filosofici, concentrò la sua attenzione sui problemi farmaceutici.

Nel Seicento continuarono tuttavia a scrivere ed operare molti alchimisti di orientamento paracelsiano e rosacrociano: basta ricordare i nomi del mistico tedesco Michael Maier (1568-1622), autore dell'*Atalanta fugiens* (1618), che costituisce un esempio di applicazione della mitologia classica all'alchimia, e del polacco Michele Sendivogius (Sędziwoj, 1556-1636 o 1646). L'idea di un'origine ermetica, antichissima, egiziana della chimica mantenne a lungo piena validità. Ancora nel 1668 il medico danese Olaus Borrichius (Borch, 1626-1690) difendeva questa idea nel *De ortu et progressu chemiae*.

3. *Chimica medica e analisi delle sostanze.*

Il riconoscimento delle medicine di origine minerale da parte dei paracelsiani, il legame che si stabilì tra medicina e ricerca chimica portarono a privilegiare decisamente l'aspetto «farmaceutico» dell'indagine. I farmacisti e gli iatrochimici erano spesso autodidatti di umili origini che si dedicavano all'esercizio della medicina o (a causa dell'opposizione delle Facoltà mediche e teologiche) ad occupazioni pratico-tecniche che avevano attinenza con l'estrazione dei minerali, del sale comune e con la preparazione di medicamenti. Questa attività pratica consentì loro di realizzare la scoperta di molte sostanze chimiche nuove e di favorirne l'uso. Tali sostanze furono spesso designate con i nomi dei loro scopritori (ad esempio lo *spirito di Mindererus* designava una soluzione di acetato d'ammonio usata da Raymond Minderer (?-1621), che è autore di un importante trattato dal titolo *De calcantho, seu vitriolo* del 1617).

All'inizio del Seicento la chimica cominciò ad assumere lo status di scienza specifica. Il riconoscimento ufficiale e accademico di questa scienza fu tuttavia posteriore rispetto all'emergenza di un «chimico» di professione, vale a dire di un personaggio che mostra maggiori affinità con un chimico moderno che non con l'alchimista o con il filosofo rinascimentale. Il centro della ricerca e dell'insegnamento chimico fu solo in casi rarissimi l'università: il negozio privato del farmacista, le accademie mineralogiche e metallurgiche, gli orti botanici divennero i luoghi deputati per la diffusione della chimica.

Nel 1610 il farmacista francese Jean Beguin (ca. 1550-1620) pubblicò il *Tyrocinium chimicum*, un'opera che, ampliata e tradotta con il titolo di *Elémens de chymie*, divenne molto popolare nella prima metà del Seicento. Non si tratta certamente di un moderno manuale. Il significato del *Tyrocinium* è da vedersi nell'indicazione del modello di trattato che fu utilizzato per tutto il XVII secolo: una breve parte teorica e un'ampia parte pratica che aveva spesso tenui relazioni con la teoria. Si tratta in effetti di una raccolta eterogenea di ricette per la preparazione di rimedi chimici. Per Beguin la chimica era infatti un'arte «dissolutiva» (analitica) al servizio della medicina: l'attività del chimico consisteva nel preparare medicamenti gradevoli, sani e sicuri. Ma Beguin rivendicò alla chimica anche una specificità di contenuti e di funzioni ponendola accanto alla fisica e alla medicina. La chimica non entra in contrasto con queste due scienze perché è dotata di diversi e specifici principi. I veri principi della chimica sono i *tria prima* di Paracelso: sale, zolfo e mercurio. Si tratta di sostanze portatrici di caratteristiche e qualità che il chimico ottiene dalla risoluzione dei corpi. Ma per Beguin i *tria prima* non sono soltanto sostanze materiali: i principi ammessi nel *Tyrocinium* non sono corpi perché impregnati dei semi delle

cose, né sono spiriti in quanto corpi, ma partecipano, allo stesso tempo, della materialità e della spiritualità. Non sono neppure puri in sé, perché ciascuno partecipa della natura dell'altro. Pur essendo, per definizione, risultati di procedimenti analitici, i principi di Beguin si configurano come agenti metafisici, matrici di tutte le cose.

La chimica pratica e farmaceutica si sviluppò, nel Seicento, prevalentemente sul continente: la presenza di grandi saline, di miniere, di sorgenti di acque minerali rappresentava un potente stimolo per la ricerca. Quest'ultima si concentrò soprattutto verso il «sale». Un termine che designava non solo il principio paracelsiano ma anche una classe di sostanze diverse che possedevano caratteri comuni (solubilità, forma cristallina, gusto «salino»). Quel termine giunse, di fatto, ad indicare acidi, alcali e i veri e propri sali.

Il medico italiano Angelo Sala (1576?-1637) visitò, tra il 1602 e il 1612, varie città tedesche e, dopo un lungo soggiorno a Leida, si stabilì in Germania dove pubblicò molte opere in tedesco. Sala considerava la chimica un'arte perché il suo interesse era principalmente farmaceutico. Nel 1609 pubblicò l'*Anatomia vitrioli* che presentava uno studio del vitriolo blu (solfato di rame: $CuSO_4 \cdot 5H_2O$), ottenuto con quantità determinate di rame, spirito di zolfo (acido solforico) e acqua. Non si limitò a sintetizzare questo composto, ma effettuò anche la sua analisi ottenendo i costituenti di partenza. Questo duplice processo dimostrava, a suo parere, la costanza della composizione del sale e la perfetta identità tra il «vitriolo» in natura e quello prodotto in laboratorio. L'attenzione per il «vitriolo» fu particolarmente viva nel Seicento. Se ne occuparono anche Minderer e Pietro Canepari (*De atramentis*, 1619) che lo considerarono il principio mediatore tra pietre e metalli.

Il più grande chimico analitico del Seicento fu senza dubbio Johann Rudolph Glauber (1603-1670). Nato a Karlstadt, autodidatta, Glauber svolse la sua attività soprattutto in Olanda. Tra il 1646 e il 1650 pubblicò i *Furni novi philosophici oder Beschreibung einer neue erfundenen Destillirkunst* (Forni nuovi filosofici o descrizione di una nuova arte di distillare), nei quali si ritrova una chiara e precisa descrizione delle principali operazioni di chimica pratica. Per la loro chiarezza i *Furni* sono il primo trattato di pratica chimica che rompe decisamente con opere compilative ed enciclopediche (come quelle di Libavius) e con quelle caratteristiche della «filosofia chimica». In quest'opera, Glauber descrisse la preparazione degli acidi minerali (idrocloridrico, nitrico e solforico) e di alcuni sali derivati da questi acidi. I *Furni* vennero tradotti in latino, francese e inglese e divennero un'opera popolarissima che richiamò l'attenzione dei baconiani inglesi che si rivolsero a Glauber per consigli tecnici. Glauber era particolarmente interessato a questioni di carattere economico e pratico. La guerra dei

Trent'anni ebbe un profondo impatto sulla sua opera. Tra il 1656 e il 1661 pubblicò *Des Teutschlants Wohlfahrt* (Della prosperità della Germania), nella quale si occupò dei problemi alimentari, politici ed economici della Germania che potevano essere risolti, secondo lui, con una consapevole applicazione delle risorse teoriche della filosofia chimica.

L'aspetto tecnico-pratico ha un ruolo di primo piano nella chimica di Glauber la cui struttura è tuttavia pienamente comprensibile solo se posta in relazione con la tradizione paracelsiana. Da quest'ultima Glauber derivò concetti essenziali (analogia macrocosmo-microcosmo; esistenza di *semina* astrali, l'immagine dei metalli come esseri viventi). Nel suo sistema il «sale» occupa una posizione centrale e svolge un ruolo primario nei mutamenti della materia. Nel 1658 Glauber definì l'alchimia o chimica una «scienza o arte, nella quale, mediante il fuoco e il sale, i metalli immaturi ed impuri sono distrutti e purgati e, mediante un artificio singolare, le loro parti più pure sono convertite in forma e specie migliori» (Glauber [1658] 1660, 12). Il sale è dunque, con il fuoco, l'agente della trasmutazione dei metalli. Nel *Tractatus de natura salium oder ausfurhliche Beschreibung deren bekannten Salien* (Tractatus de natura salium o descrizione dettagliata dei sali noti, 1658), Glauber indicò che nel mondo esistono due creature divine: il fuoco e il sale. Il primo è l'elemento superiore, il secondo è l'elemento inferiore, il caos iniziale paracelsiano, la vita delle cose. Non è quindi sorprendente ritrovare nelle sue opere un simbolo che presenta un quadrato inscritto in un cerchio che porta queste parole: *In Sole et Sale omnia*. Glauber cercò di isolare concretamente la sostanza salina che svolgeva la funzione di principio universale. Questo sale universale venne specificato in sostanze diverse. Nelle prime parti del *Miraculum mundi oder ausfuhrliche Beschreibung der wunderbaren Natur* (Miraculum mundi o descrizione dettagliata delle meraviglie della natura, 1653-57), Glauber vide nel salnitro (KNO_3), distinto in spirito di nitro e nitro fisso, il sale universale. Nell'ultima parte di quest'opera (1660) il *sale di Glauber* prese il posto del salnitro. Si tratta del solfato di sodio, preparato per azione dell'acido solforico sul cloruro di sodio ($NaCl + H_2SO_4 \rightarrow HCl + Na_2SO_4$). Glauber lo identificò con il *Sal Enixum* di Paracelso, ma gli attribuì un nome diverso perché non voleva che altri chimici arrivassero ad identificare la sua origine. Non indicò mai in maniera chiara e precisa i costituenti del suo sale e, per mascherarne la reale composizione, ricorse alle metafore tipiche della tradizione alchemica. Alla radice di questo atteggiamento vi è una ragione pratica: Glauber vendeva il suo sale con profitti finanziari non trascurabili e desiderava che la preparazione rimanesse segreta. Nel caso del salnitro egli concentrò la sua attenzione sulle applicazioni pratiche (occorre ricordare che il salnitro era divenuto importante in Occidente come componente della polvere da sparo e perché

produceva l'acqua regia), nel caso del sale mirabile considerò invece il suo uso in medicina. In effetti il sale mirabile o sale di Glauber costituì (con il sale di Epsom — solfato di magnesio — individuato da N. Grew) una popolarissima medicina. Occorre tuttavia tener presente che Glauber, pur avendo isolato vari sali come sostanze specifiche e dotate di composizione propria, credeva all'esistenza di un solo sale originario: riteneva che gli altri fossero prodotti per trasmutazione chimica.

L'opera di Glauber costituisce un esempio significativo del ruolo svolto dal paracelsismo nella storia della rivoluzione scientifica. Nella sua chimica le pratiche di laboratorio, i suggerimenti provenienti dal mondo della produzione artigianale, l'interesse per le applicazioni concrete della conoscenza occupano una posizione privilegiata. Fanno parte però di una complessiva immagine «chimica» della natura. La critica alle concezioni tradizionali non portò i chimici ad abbandonare immagini filosofiche, ma piuttosto ad elaborare una nuova filosofia che fosse in accordo con le loro impostazioni religiose e che guidasse la pratica di laboratorio. La crescita della tecnologia europea all'inizio del Rinascimento portò ad un incremento formidabile della produzione di certe sostanze chimiche rispetto all'antichità. Ma la nascita della figura specifica del chimico fu il risultato dell'affermazione della iatrochimica. All'alchimista non si sostituì l'empirista puro, l'artigiano, bensì il chimico-medico, il chimico-farmacista che divenne consapevole della possibilità di produrre mediante l'arte sostanze identiche a quelle prodotte dalla natura.

Le molteplici ricerche compiute sugli acidi, sugli alcali e sui sali concentrarono l'attenzione dei chimico-medici sul processo di neutralizzazione. Van Helmont aveva elaborato una spiegazione della digestione fondata sull'acido quale agente principale di trasformazione degli alimenti e aveva notato la neutralizzazione acido-alcali che si verifica nell'intestino grazie alla bile. Questo concetto di neutralizzazione, sorto nel contesto della fisiologia della digestione, assunse un'importanza fondamentale per i chimici del Seicento. Nelle opere del medico tedesco (ma operante a Venezia) Otto Tachenius (?-1670?) *Hippocrates chemicus* (1666); *Antiquissimae Hippocraticae medicinae clavis manuali experientia in naturae fontibus elaborata* (1668) si ritrova ad esempio la teoria dell'acido e dell'alcali come principi delle cose: l'acido, principio maschile, caldo e secco, l'alcali, principio femminile, umido e freddo, corrispondevano per Tachenius al fuoco e all'acqua di Ippocrate, perché egli, attraverso il dualismo acido-alcali, intendeva restaurare l'antica chimica ippocratica. Michael Ettmueller (1644-1683) ammetteva invece un sale universale che si specificava nelle cose in due specie: acido e alcali. La teorizzazione di un antagonismo assoluto tra acidi e alcali è presente nelle opere del medico Franciscus de le Boë detto Sylvius

(1614-1672), per il quale la materia era costituita da due principi in contrasto la cui lotta produceva effervescenza, liberazione di calore e di vapori nella maggior parte delle reazioni. Sylvius seguì la teoria della digestione di Helmont, ma fondò la teorizzazione del dualismo acido-alcali anche su esperienze chimiche: ad esempio la precipitazione di un metallo in soluzione, mediante l'addizione di un altro metallo in possesso di una maggiore affinità per il solvente, era dovuta alle diverse affinità dei metalli (alcali) per lo spirito acido; la formazione di un precipitato nell'unione di una soluzione di sale di tartaro (carbonato di potassio) e di vitriolo era dovuta ad una fuga dello zolfo provocata dallo spirito acido del vitriolo. Sylvius giunse ad affermare che la causa della circolazione del sangue era da individuare nell'interazione periodica acido-alcali che si sarebbe verificata nei ventricoli del cuore. Per aver chiaro il ruolo svolto dal dualismo acido-alcali basterà ricordare che François André propose, nei suoi *Entretiens sur l'acide et l'alcali* (1672), di sostituire i vari sistemi (aristotelici e paracelsiani) sugli elementi con una nuova teoria nella quale i soli componenti di tutti i corpi erano l'acido e l'alcali.

Contemporaneamente a queste ricerche e teorie chimico-mediche, venne a maturazione in Francia una trattatistica che segna la data di nascita della vera e propria manualistica chimica. La scienza francese si segnala infatti per un articolato sviluppo della chimica farmaceutica. Centro di insegnamento e di diffusione di questa chimica fu il *Jardin Royal des Plantes* di Parigi, aperto ufficialmente nel 1640 e la cui fondazione fu il frutto degli sforzi del paracelsiano Guy de La Brosse (1586-1641), medico di Luigi XIII, presso il quale si formarono per oltre un secolo intere generazioni di chimici. Nel 1648 fu formalmente stabilita al *Jardin* la cattedra di chimica che fu affidata allo scozzese William Davidson (*gallice* Davisson o d'Avisson, 1593-?) che divenne anche *Intendant*. Davidson era noto da tempo a Parigi come insegnante. Le sue lezioni seguivano probabilmente lo schema di Beguin e negli anni 1633-35 il loro contenuto fu pubblicato nella sua *Philosophia Pyrotechnica, seu curriculus chymiatricus*, un'opera che rifletteva chiaramente le idee di Paracelso. In effetti, nel 1660, Davidson pubblicò un Commentario all'*Idea* di Severino, uno dei testi classici della tradizione paracelsiana. Nel 1660 Davidson aveva da tempo lasciato gli incarichi al *Jardin* e in questo anno il suo successore alla cattedra di chimica Nicaise Le Febvre (1610-1669) pubblicò il suo fortunato *Traité de la chymie*.

Per Le Febvre la chimica era contemporaneamente scienza (in quanto conoscenza contemplativa) ed arte pratica (in quanto azione sui corpi) e risultava costituita da tre parti: 1) chimica filosofica, che si limitava alla contemplazione delle cause dei fenomeni cosmologici, sui quali il chimico non poteva intervenire direttamente; 2) iatrochimica, nella quale alla

contemplazione seguiva l'operazione e venivano applicate alla pratica medica le teorie della chimica filosofica; 3) chimica farmaceutica, arte esclusivamente operativa, che ricercava la preparazione dei rimedi contro le malattie. La teoria di composizione della materia di Le Febvre risulta assai complessa (e confusa). Il chimico francese distingueva nettamente tra elementi e principi. I primi erano le matrici delle cose, capaci di specificare lo Spirito Universale attraverso i diversi fermenti o semi. In effetti per Le Febvre esisteva un'unica sostanza fondamentale: lo Spirito Universale o Vitale, detto anche Albero di vita e Mummia vitale, che era unico in essenza ma trino in denominazione. I tre principi paracelsiani specificavano formalmente lo Spirito Universale. Gli elementi aristotelici svolgevano il ruolo di matrici (o regioni cosmogoniche) nelle quali trovava la sua determinazione essenziale lo Spirito. Le Febvre ammetteva poi cinque principi concreti quali prodotti di analisi chimiche: mercurio, zolfo, sale (attivi), acqua o flegma, terra o testa morta (passivi). Schematicamente si può dire che per Le Febvre il mondo era costituito da:
1) uno Spirito universale, unico in essenza e trino in denominazione (sale, zolfo, mercurio);
2) quattro elementi (aria, terra, acqua, fuoco) come matrici dei corpi;
3) cinque principi oggetto (e risultato) dell'analisi chimica.

Nel *Traité de la chymie* (1663) di Christophe Glaser (1615-1672?) si ritrova un'impostazione generale più concreta e più specificamente operativa rispetto all'approccio di Le Febvre. Anche Glaser fu (a partire dal 1662) dimostratore di chimica al *Jardin Royale*, ma nel suo corso evitò le discussioni cosmologiche. Il passaggio dal *Traité* di Le Febvre a quello di Glaser — e all'opera del suo successore al *Jardin*, il farmacista protestante Moyse Charas (1619-1698) — vale a mostrare il crescente dominio esercitato dalla farmaceutica sulla chimica e la definitiva esclusione delle speculazioni di Paracelso e di van Helmont. La parte teorica iniziale del trattato di Glaser è particolarmente ridotta, molto ampia è invece la parte pratica che presenta le operazioni e le preparazioni chimiche. Per Glaser la chimica è un'arte di inestimabile valore, utile non solo al medico e al fisico ma anche a varie categorie di artigiani. L'atteggiamento antispeculativo di Glaser risulta dall'attenzione che egli rivolge alla pratica di laboratorio. Il *Traité* fornisce un lungo elenco di operazioni: alla tradizionale operazione della distillazione (che risaliva ai primordi dell'alchimia) Glaser affianca molteplici operazioni, sia meccaniche, sia rigidamente chimiche. Vengono ammessi solo i cinque principi: spirito, sale, zolfo, acqua e terra.

La teoria dei cinque principi o elementi aveva sollevato varie discussioni (era stata descritta e rifiutata da Sebastiano Basson nel 1621; nel 1624 era stata ufficialmente condannata a Parigi), ma venne accettata oltre che da Davidson, Le Febvre e Glaser, anche da Thomas Willis, Etienne de Clave

(autore delle *Nouvelles lumières philosophiques des vrais principes de la nature*, 1641), Nicolas Lémery e divenne una delle principali concezioni della costituzione della materia.

Nel testo di Glaser compare una teoria della calcinazione (ossidazione) dei metalli che era destinata ad avere una grande fortuna nella storia della chimica. Secondo Glaser i metalli, sottoposti all'azione del fuoco, si trasformano in calci e aumentano di peso. Questo aumento è provocato dai corpuscoli ignei che si combinano con i metalli. L'ammissione di corpuscoli ignei è un chiaro indizio delle penetrazione della filosofia meccanica nelle teorie chimiche.

4. *Chimica e filosofia meccanica: Robert Boyle.*

La meccanizzazione del quadro del mondo, la penetrazione della filosofia meccanica nella scienza rese ancor più complesso il panorama della chimica del Seicento. L'introduzione della distinzione tra il mondo *soggettivo* dell'esperienza sensibile e quello *oggettivo*, costituito da corpuscoli in movimento, consentì di ricondurre la materia ad un insieme di *minima* (atomi, particelle) partecipi di un sistema dinamico. L'atomismo fu spesso inserito in contesti aristotelici: si presentò dunque come una semplice visione particellare della materia che non si poneva in contrasto né con la dottrina dei quattro elementi, né con quella delle *forme* concepite come principi attivi operanti su una materia che è ricettacolo passivo.

Il naturalista e chimico tedesco Joachim Jungius (1587-1657) criticò duramente la filosofia aristotelica, rifiutò quindi le forme sostanziali e i quattro elementi. Ma non accettò neppure la dottrina paracelsiana dei tre principi, ricorse perciò all'unica alternativa allora possibile: una visione atomistico-meccanica della materia che assumeva l'esistenza di particelle invisibili prive di forme e dimensioni fisse. La filosofia chimica di Jungius prevedeva anche un concetto particolare di elemento chimico (o principio ipostatico) che veniva definito in maniera analitica. Ma questi principi ipostatici, come ha dimostrato Christoph Meinel, erano più categorie logiche di spiegazione che entità reali. L'atomismo e la nozione di elemento sono in Jungius ipotesi complementari e necessarie per comprendere fenomeni chimici e fisici (Meinel, 1982).

La piena utilizzazione della filosofia meccanica in campo chimico è legata soprattutto al nome dell'inglese Robert Boyle (1627-1691). La tradizionale immagine di Boyle «fondatore» della chimica moderna è stata fortemente messa in crisi dalla più recente storiografia. Boyle non era né un medico, né un farmacista, né un alchimista, bensì un «filosofo naturale» che vide nella chimica la scienza capace di fornire una fondazione empirica alla visione

meccanica della natura (Boas, 1958). Boyle cercò di dimostrare che tutti i fenomeni naturali resi noti dalla chimica, i fatti e i processi fisico-chimici potevano essere chiaramente spiegati sulla base di un'ipotesi meccanica e corpuscolare. Boyle non fu soltanto un fisico e un teorico ma anche un abile sperimentatore. Ideò metodi originali di ricerca, effettuò esperimenti di controllo, elaborò nuovi metodi di analisi per individuare l'andamento delle reazioni chimiche. Vedeva in una reazione una ristrutturazione delle particelle componenti dei reagenti. Le proprietà qualitative e quelle chimiche dei corpi erano solo un prodotto della struttura meccanico-particellare dei corpi stessi: tutte le sostanze erano costituite da particelle di una medesima materia, erano perciò soggette soltanto a diverse strutturazioni. La chimica cessava di essere un'arte pratica (o la ricerca della pietra filosofale): diventava una parte della filosofia naturale.

The Sceptical Chymist (1661) è una delle opere più famose (e più fraintese) di Boyle. Molti storici hanno visto presente in quest'opera la prima definizione moderna del concetto di elemento chimico. In realtà la definizione di Boyle non esprime una nuova concezione di elemento: riprende la definizione degli elementi come componenti di tutti i corpi misti, che è presente in tutta la trattatistica chimica del Seicento. Il recupero di questo concetto è tuttavia decisamente critico: per Boyle la materia non è costituita da pochi elementi, ma da particelle (*minima naturalia*) che si uniscono insieme per formare concrezioni particellari (*prima mixta*) che, mediante combinazioni, costituiscono a loro volta i corpi macroscopici oggetto di studio della chimica. I chimici del Seicento definivano gli elementi come prodotti ultimi dell'anatomia della natura, ma questi elementi erano *universalmente* presenti nei corpi. Una sostanza qualsiasi, sottoposta ad analisi, doveva sempre produrre o i *tria prima* paracelsiani, o i *quattro elementi* aristotelici, o i *cinque principi* accettati dai chimici francesi. Boyle dimostrò che l'interpretazione dei fenomeni chimici sulla base di elementi non era scientificamente fondata. In conformità alla visione seicentesca degli elementi come sostanze universalmente presenti affermò che le particelle della materia erano i *soli elementi*. La filosofia meccanica rendeva impossibile l'esistenza degli elementi: la teoria particellare era talmente incorporata nella chimica boyliana che il concetto di sostanze stabili o elementari era — assumendo quel punto di vista — assolutamente inaccettabile. A questo stadio dell'evoluzione del pensiero chimico elementi e particelle si configurano come *concetti contraddittori*.

The Sceptical Chymist non propone dunque una visione moderna degli elementi; è piuttosto incentrato sulla sostituzione dell'approccio aristotelico e di quello paracelsiano con un approccio meccanico ai fenomeni della chimica. Per la prima volta veniva fornita una dimostrazione delle insuf-

ficienze teorico-sperimentali della filosofia aristotelica e della filosofia chimica e veniva effettuato un primo tentativo di spiegazione delle forme e delle qualità dei corpi basato sulla filosofia meccanica. Boyle presentò una teoria più completa della struttura corpuscolare della materia in *The Origins of Forms and Qualities According to the Corpuscolar Philosophy* del 1666. Qui egli riconduce le qualità dei corpi ai movimenti dei corpuscoli invisibili: il corpuscolarismo dinamico spiega le caratteristiche delle sostanze e le reazioni reciproche.

La filosofia meccanica consentì a Boyle di sottoporre a una dura critica non solo le dottrine degli aristotelici e dei paracelsiani (per il chimico inglese i *tria prima* non erano altro che concrezioni particellari prodotte dall'applicazione del fuoco; Boyle seguiva van Helmont nel considerare il fuoco uno strumento *creatore* di classi di sostanze), ma anche altre specifiche dottrine che, come si è visto, erano venute emergendo nella chimica del Seicento, in particolare la teoria dei principi « duellanti », cioè dell'alcali e dell'acido come principi opposti dei corpi. Boyle accettò e chiarì (grazie all'uso degli indicatori colorati da lui introdotti nella pratica chimica) la distinzione tra acido e alcali. Nelle *Reflections upon the Hypothesis of Alcali and Acidum* (1675) criticò tuttavia la riduzione di tutti i corpi oggetto della chimica alle sole categorie di acido e di alcali.

L'opera di Boyle copre un vastissimo campo di temi e di problemi di notevole interesse teologico, filosofico, storico, fisico, chimico. Nell'ambito strettamente chimico occorre sottolineare una conseguenza importante della teoria corpuscolare. La visione della materia come sostrato omogeneo costituito di particelle di forme diverse implicava l'accettazione della trasmutazione dei corpi. Boyle ammette infatti la possibilità che, attraverso diverse ristrutturazioni delle concrezioni particellari, una sostanza qualsiasi possa essere trasformata in un'altra di natura diversa. Questa accettazione della trasmutazione consente di chiarire ulteriormente che la filosofia chimica boyliana è assai lontana da una concezione degli elementi come componenti stabili dei corpi. Boyle utilizza a più riprese, contro i paracelsiani, proprio la trasmutazione dei tre principi. È tuttavia opportuno tener presente che la trasmutazione ammessa da Boyle è ben diversa dalla trasmutazione mistica degli alchimisti. La metamorfosi di un corpo, per Boyle, non è che un corollario conseguente alla concezione corpuscolare della materia: le proprietà dei corpi sono dovute ai risultati dei movimenti delle particelle componenti i corpi stessi. Intervenendo quindi sulla loro forma (nel senso baconiano di struttura interna, di schematismo latente) è teoricamente possibile trasformare una sostanza (ad es. un metallo) in un'altra sostanza (un altro metallo). La filosofia meccanica consente dunque l'acquisizione di vari concetti della tradizione alchemico-paracelsiana, ma questi concetti

vengono integralmente spogliati dei loro connotati originali. Il significato di questa trasposizione risulta chiaro dal problema delle capacità terapeutiche delle gemme. Boyle ammetteva le «magiche» virtù mediche delle pietre preziose, ma quest'ammissione si fonda su un criterio rigidamente meccanico: le gemme sono in grado di emettere fasci di particelle terapeuticamente efficaci che si depositano sul corpo umano.

Le indagini chimiche di Boyle furono dirette anche verso i fenomeni di combustione, di calcinazione e di respirazione. La sua trattazione delle proprietà dell'aria fu quasi sempre strettamente fisica: nelle sue opere non è reperibile un chiaro concetto moderno di gas e di mistione di gas diversi. Boyle aveva notato che l'aria era necessaria alla combustione e alla respirazione, ma aveva anche notato che il residuo aereo di questi processi conservava il carattere elastico, ossia l'elasticità dell'aria persisteva in modo stabile. Ne dedusse che l'aria atmosferica era composta da tre distinte specie di particelle. Le particelle di terzo tipo — elastiche in modo permanente — costituivano la struttura materiale fondamentale dell'aria atmosferica e delle *factitious airs* rintracciabili mediante esperienze. Le reazioni chimiche avvenivano tra i corpuscoli eterogenei e contaminanti (corpuscoli di primo e secondo tipo) e le altre sostanze, mentre le particelle di terzo tipo — il medium elastico — rimanevano inalterate. In sintesi: per Boyle l'aria atmosferica era una sostanza costituita da particelle elastiche nelle quali erano dispersi corpuscoli di altro tipo. Il processo di combustione necessita della presenza dell'aria perché quest'ultima contiene una sostanza astrale, solare, un *pabulum* che alimenta la fiamma. Questa concezione della natura e del ruolo dell'aria nei processi pneumatici è rigidamente fisica. Di conseguenza Boyle non assegnò all'aria alcuna funzione nel processo di calcinazione (ossidazione) dei metalli: agente responsabile della trasformazione dei metalli in calci (ossidi) erano le particelle del fuoco. Durante la calcinazione le particelle ignee passavano infatti attraverso i crogiuoli, si combinavano con i metalli, ne aumentavano il peso e li trasformavano in calci.

Nella teoria di Boyle il processo di combustione e il processo di calcinazione risultano fenomeni di segno opposto: di scomposizione il primo (distruzione dell'alimento del fuoco), di composizione il secondo (combinazione delle particelle ignee con i metalli). Solo alla fine del Seicento Georg Ernst Stahl poté considerare, grazie alla sua teoria del flogisto, combustione e calcinazione come fenomeni della stessa natura chimica.

5. *Aria, zolfo e nitro-aereo.*

Nel 1617 Fludd aveva descritto l'esperienza della combustione di una candela posta sull'acqua e sotto una campana di vetro. Fludd aveva notato

che l'acqua si innalzava nella campana per effetto della combustione. Essendo interessato a questioni metafisiche più che alle caratteristiche dell'aria, non si pose domande appropriate e non giunse a risultati teoricamente rilevanti.

Già da molti secoli i filosofi naturali e i medici avevano osservato che l'aria è necessaria alla combustione e alla respirazione. Le loro ricerche si erano indirizzate verso l'individuazione di uno spirito vitale presente nell'aria e responsabile di questi fenomeni. L'esperienza effettuata da Fludd divenne un oggetto privilegiato di studio anche in conseguenza dell'invenzione e dell'utilizzazione, nella pratica sperimentale, della pompa pneumatica.

Robert Hooke (1635-1703) effettuò molteplici esperienze sulla combustione dei corpi; un'esposizione sistematica della sua teoria si ritrova nella *Micrographia* (1665). Secondo Hooke nella combustione si verifica una dissoluzione dei corpi combustibili ad opera di una sostanza *nitrosa* presente nell'aria. Aveva infatti osservato che la combustione non avveniva nel vuoto della macchina pneumatica e che un agente dissolvente era necessario in tale operazione. In modo molto schematico la sua teoria può essere riassunta nei punti seguenti:

1) l'aria è il dissolvente universale dei corpi solforosi (combustibili);
2) l'azione di dissoluzione produce un grande calore che si chiama fuoco;
3) la dissoluzione dei corpi solforosi è provocata da una sostanza nitrosa presente nell'aria, simile per natura a quella fissata nel salnitro.

La teoria di Hooke vede quindi nella combustione una «soluzione» di corpi solforosi in un «mestruo» (solvente) *aereo* di natura nitrosa.

È opportuno chiarire con precisione il significato dell'aggettivo *aereo*: nel Seicento questo termine indicava un corpo derivato dall'aria, presente nell'aria; solo agli inizi del Settecento cominciò ad assumere il valore semantico di *aeriforme*. Le opere di J. Mayow e di J. Rey valgono ad illustrare in maniera esemplare le modalità di trattazione chimica dell'elemento *aria* nel Seicento.

Nel 1674 il medico inglese John Mayow (1641-1679) pubblicò i suoi *Tractatus Quinque Medico-Physici*, nei quali proponeva spiegazioni di fenomeni chimici e fisiologici basate sull'esistenza di particelle igneo-aeree o nitro-aeree. Mayow era uno sperimentatore accurato che concentrò la sua attenzione sulle analogie tra la combustione e la respirazione. Inventò un apparato pneumatico per esperienze di respirazione e combustione in recipienti a chiusura idraulica che era destinato a svolgere un ruolo essenziale nella chimica pneumatica del Settecento. Per Mayow l'aria era costituita essenzialmente da due parti: una parte inerte e una piccola quantità di particelle attive denominate nitrose o, più frequentemente, spirito nitro-aereo. Questo spirito rendeva l'aria respirabile ed esercitava un ruolo

essenziale nella combustione. Nel caso specifico di questo processo occorre sottolineare che Mayow ammetteva, oltre ai corpuscoli nitro-aerei, particelle solforose quali ingredienti dei corpi combustibili. La combustione di un corpo era dovuta al contrasto tra particelle nitro-aeree e particelle solforose. Quando questa avveniva in un ambiente a chiusura idraulica, si verificava una diminuzione del volume dell'aria racchiusa e una riduzione della sua elasticità a causa della distruzione dello spirito nitro-aereo; quest'ultimo era dunque anche la causa dell'elasticità dell'aria.

Tra la fine del Settecento e gli inizi dell'Ottocento molti studiosi videro in Mayow un precursore di Lavoisier (e di Priestley): il suo nitro-aereo non sarebbe altro che l'ossigeno lavoisieriano. La ricerca dei precursori, alla quale si sono dedicati in passato molti storici, non appare — almeno in questo caso — affatto giustificata. La chimica di Mayow *non* è una scienza dello stato gassoso dei corpi, lo spirito nitro-aereo *non è* un gas, ma un principio attivo di origine paracelsiana formulato in termini meccanicisti. L'idea di una parte attiva, nitrosa dell'aria era ampiamente diffusa nell'alchimia (Sendivogius parla di nitro aereo nel *Novum Lumen Chymicum* del 1604), nella iatrochimica (Fludd vide nel nitro la causa delle caratteristiche del sangue arterioso), nella «geologia» (A. Kircher attribuì, nel *Mundus subterraneus*, i terremoti all'esplosione di vapori solforosi e nitrosi) e persino nella letteratura del Seicento. Tale diffusione è giustificata dalla sua origine: le opere di Paracelso.

Nel 1630 un oscuro medico provinciale francese di nome Jean Rey (?-1645) pubblicò degli *Essays*, che conobbero un'ampia diffusione solo nella seconda metà del Settecento sulla scia delle scoperte pneumatiche. In quest'opera Rey ricercava la causa dell'aumento di peso rilevato nello stagno e nel piombo sottoposti all'azione del fuoco. Il «misterioso» fenomeno dell'aumento di peso dei metalli calcinati (misterioso perché, come indicava Biringuccio, è nella natura intrinseca del fuoco consumare e diminuire le sostanze) aveva spinto Biringuccio, Cardano, Scaligero, Tachenius, Le Febvre ad elaborare varie soluzioni teoriche. Si è accennato in precedenza alle concezioni igneo-particellari di Glaser e di Boyle. Negli *Essays* Rey presentò una trattazione originale del fenomeno della calcinazione nella quale considerazioni di ordine filosofico si sposano a considerazioni di ordine chimico per dar vita ad uno specifico modello fisico-meccanico, non pneumatico. Il punto centrale della discussione è costituito dalla dimostrazione della pesantezza dell'aria. Secondo Rey tutti i corpi naturali sono dotati di peso e proprio nella pesantezza della materia sta la causa efficiente della mancanza di vuoto nell'universo. Le prove razionali — alle quali Rey attribuiva un valore epistemologico superiore rispetto a quelle sperimentali — dimostravano che l'aria, in quanto materia, era dotata di peso. Questa

affermazione è strettamente connessa ad un principio: il fuoco ha la capacità di rendere l'aria più spessa, quindi più pesante. Rey fonda dunque la sua spiegazione del misterioso fenomeno della calcinazione su questi due concetti: pesantezza dell'aria e azione del fuoco. Questa spiegazione può essere così sintetizzata: l'aria, resa spessa, compatta e adesiva dal fuoco, si unisce con i metalli ridotti in calce e li rende più pesanti. Ma per Rey l'aumento in peso era riscontrabile solo nella calcinazione dello stagno e del piombo, perché gli altri metalli perdevano, in questa operazione, una quantità eccessiva di sostanze volatili (zolfo e mercurio) e il residuo (ceneri o calci) non era in grado (per difetto di quantità) di combinarsi con l'aria ispessita dal fuoco. La combinazione dell'aria non avveniva dunque con i metalli, ma con i loro residui, ovvero:
calci (ossidi) = aria (resa spessa dal fuoco) + residui della scomposizione dello stagno e del piombo.
Ai problemi posti dalla calcinazione Rey non offrì una soluzione «pneumatica», ma meccanica, fondata su concetti fisici e chimici.

6. *La sintesi di Nicolas Lémery: il meccanicismo chimico.*

Nel 1675 vide la luce il *Cours de chymie* del farmacista francese Nicolas Lémery (1645-1715) che segna una data importante nello sviluppo delle teorie chimiche. Il *Cours* — che ebbe oltre trenta edizioni — segue un modello che era divenuto canonico: una breve sezione teorica e un'amplissima parte pratica nella quale vengono riportate indicazioni e ricette per la preparazione di sostanze medicamentose. Il successo che arrise al *Cours* non è dovuto ad una sua originalità di concezioni o di scoperte ma al fatto che le *tenèbres* associate sino ad allora alla chimica erano progressivamente scomparse a favore di idee semplici e chiare, a favore di un linguaggio specifico che rinviava a pratiche operative.

La breve sezione teorica è improntata ad una visione atomistico-meccanica della materia, ma l'atomismo di Lémery è ben diverso da quello di Boyle perché il chimico francese riteneva da un lato che la filosofia meccanica potesse eliminare le spiegazioni vaghe e mistiche dei paracelsiani, ma dall'altro era consapevole dell'impossibilità di un suo uso radicale nella redazione di un corso di chimica medica. Tentò di fatto di armonizzare meccanismi particellari invisibili con il corpus di conoscenze chimiche acquisite dalla tradizione iatrochimica. La chimica meccanica di Lémery aveva come scopo non la formulazione di una teoria chimica completa ma la spiegazione degli effetti osservati nelle reazioni. Le particelle di forme diverse che egli utilizzava non erano né osservate né sperimentate: erano *dedotte* sulla base delle proprietà esibite dalle sostanze a livello sensibile. Di conseguenza

era lecito immaginare tutti i tipi di particelle che si rendevano necessari (particelle puntute, rotonde, porose, ecc.) per spiegare un fenomeno qualsiasi. Lémery cercò di utilizzare in modo strumentale la filosofia meccanica per proporre una versione più aggiornata della tradizionale iatrochimica. Il caso della struttura della materia è assai esemplificativo. Nel *Cours* è rintracciabile una definizione di principio chimico che è molto simile, da un punto di vista formale, a quelle dei chimici del Settecento. Lémery scrive infatti che «il nome di Principio in chimica non deve essere preso in un senso molto esatto, poiché le sostanze che meritano questo nome non sono Principi che per noi, in quanto non possiamo proseguire ulteriormente nella divisione dei Corpi ed in quanto siamo perfettamente consapevoli che questi Principi sono ancora divisibili in una infinità di parti che potrebbero, a giusto titolo, essere chiamati Principi. Intendiamo dunque con il termine Principi della chimica solo delle sostanze separate e divise fintanto che i nostri deboli sforzi ne sono capaci» (Lémery [1675], 1682, 8). Lémery accetta i cinque principi ammessi in precedenza da Le Febvre, de Clave e Glaser. In realtà, ai suoi occhi, i veri principi comuni delle cose sono le particelle, ma dato che queste ultime non erano percepibili, era necessario ricorrere agli elementi tradizionali. Lémery era consapevole che un «qualcosa» di stabile doveva esistere tra il mondo macroscopico e quello dei corpuscoli invisibili per poter costruire una iatrochimica. La materia gli appare perciò costituita da *particules* (i veri principi), da cinque principi isolati dai chimici e dai corpi oggetto di analisi. Ma queste tre componenti non stanno tra di loro in rapporti chiari e coerenti: le pagine teoriche iniziali del *Cours* sono di una precisione esemplare rispetto alla tradizione manualistica precedente, ma se si entra dentro questo testo, nella vera e propria chimica di Lémery ne risulta un quadro assai più problematico e contraddittorio.

Il nucleo del *Cours* è in realtà costituito dai rapporti acido-alcali e, di conseguenza, i cinque principi accettati in sede teorica risultano molto spesso non operativi al fine dell'interpretazione delle reazioni. Lo schema che organizza l'intera parte pratica del *Cours* è frutto del tentativo di ridurre quasi tutte le reazioni a neutralizzazioni di acidi mediante alcali. Il processo di neutralizzazione è spiegato mediante l'uso di particelle puntute (acidi) e di particelle porose (alcali). L'interesse per questo tipo di reazioni era strettamente connesso alla pratica medica. Dato che per Lémery le malattie erano infezioni acide perpetrate dall'aria, lo scopo principale della medicina e della farmaceutica consisteva nella loro neutralizzazione mediante alcali. La teoria degli elementi o principi di Lémery richiede di fatto come corollario che in ogni corpo vi sia o un alcali o un acido. Una forma particellare determinata era utilizzata per gli acidi e un'altra forma per gli alcali e,

malgrado le esperienze, Lémery affermava costantemente l'identità ultima di tutti gli acidi e di tutti gli alcali.

Il *Cours de chymie* rappresenta un tentativo di comporre una sintesi tra la tradizione iatrochimica e la filosofia meccanica (intesa come utilizzazione di forme presupposte di particelle per spiegare le proprietà delle sostanze). Un esempio di tale dicotomia teorica è costituito dalla spiegazione della combustione e della calcinazione. Lémery continuava ad ammettere l'olio (zolfo) quale principio di infiammabilità, seguendo così la tradizione paracelsiana, ma introduceva anche le particelle ignee come causa della calcinazione e del conseguente aumento in peso dei metalli. Questa seconda ammissione rende la sua teoria della combustione complessa ed oscura. Occorre anche sottolineare che la riduzione delle calci era provocata dalla fuoriuscita delle particelle ignee (precedentemente combinate), il metallo ritornava così nella sua forma originaria ma in quantità minore perché era un misto che aveva perduto, durante la calcinazione, parti volatili.

Il *Cours* di Lémery è scritto con una chiarezza difficilmente riscontrabile in opere precedenti ed ha l'indubbio merito di aver richiamato l'attenzione sulla necessità dello studio dei sali e dei loro componenti.

Alla fine del Seicento Parigi era ormai divenuta un centro importante di ricerca chimica localizzabile non solo al *Jardin*, ma anche nella rinnovata *Académie royale des sciences*. La collezione annuale di questa istituzione scientifica stampò un numero sempre più considerevole di *mémoires* dei migliori chimici del tempo. Oltre a Nicolas Lémery (che divenne membro dell'*Académie* nel 1699) vanno ricordati suo figlio Louis Lémery (1677-1743, che mantenne vivo l'approccio chimico-meccanico del padre nei primi decenni del Settecento), Samuel C. Du Clos (?-1715), Simon Boulduc (?-1729) e suo figlio Gilles-François (1675-1742), Pierre Borel (1620-1671), Claude Bourdelin (1621-1699) e soprattutto Wilhelm Homberg (1652-1715). Nato a Giava da genitori tedeschi, Homberg studiò legge e medicina a Lipsia e a Padova, quindi fisica con Otto von Guericke e chimica con Boyle. Stabilitosi a Parigi prese ad occuparsi quasi esclusivamente di chimica ed entrò a far parte dell'*Académie*. Homberg pubblicò i suoi importanti *Essays* e lavori di chimica nei *Mémoires* dell'*Académie*. Si interessò di teoria generale (il suo orientamento era meccanicistico, anche se meno rigido rispetto a quello di Lémery) e a ricerche specifiche sui sali, sulle neutralizzazioni e sulle precipitazioni. Cercò di misurare la forza degli acidi e degli alcali, di calcolare i tempi delle reazioni di neutralizzazione e effettuò studi sistematici sulla natura e composizione del sale ammoniaco e del borace.

Il meccanicismo chimico è presente in forma radicale nelle *Conjectures physiques* (1706) del fisico e biologo olandese Nicolaas Hartsoeker (1656-1725). Fortemente influenzato da Cartesio e da Gassendi, Hartsoeker non si

limitò ad utilizzare particelle di forme diverse, ma arrivò ad una vera e propria raffigurazione grafica di tali particelle. Le forme più disparate delle particelle divennero il *solo* criterio di spiegazione dei fenomeni e delle reazioni chimiche. Hartsoeker era consapevole del carattere congetturale della sua ricostruzione della chimica sulla base di forme particellari, ma rivendicò la legittimità epistemologica del suo metodo: non essendo le particelle soggette ai sensi, l'unico strumento a disposizione del chimico era quello di una immaginazione produttiva delle forme particellari.

Il meccanicismo chimico introdusse nella chimica, rispetto al confuso universo del discorso dei paracelsiani, una notevole chiarezza e condusse, sul piano concreto, ad osservazioni e scoperte significative. Ma le pretese esplicative erano spesso eccessive e i risultati ottenuti sul piano della definizione e della specificazione delle sostanze erano del tutto insufficienti. Il meccanicismo, con le sue congetture e con il suo dualismo (irrisolto) tra corpuscoli e principi, aveva finito per condurre la chimica in un vicolo cieco: il ricorso alle forme particellari diventò un criterio *troppo semplice* di spiegazione che non garantiva la possibilità di distinguere in concreto una sostanza da un'altra. Era necessario, in qualche modo, compiere una specie di passo indietro: un approccio «essenzialista» ritornò, non per caso, a rivelarsi fecondo.

7. *Meccanicismo e vitalismo tra Seicento e Settecento.*

Agli inizi del Settecento il quadro della scienza chimica presenta diversi e contrastanti approcci al mondo chimico che si richiamano a differenti tradizioni di filosofia naturale. Le difficoltà incontrate dalla chimica meccanicista a stabilire relazioni definite tra principi sensibili e corpuscoli impercettibili contribuì a favorire un diffuso scetticismo sulla possibilità di determinare i costituenti elementari della materia.

Nel 1712 il chimico olandese Johann Conrad Barchusen (1666-1723) nel suo *Compendium Ratiocinii Chemici more Geometrarum Concinnatum* definì i *principia* sostanze semplicissime e sottilissime, ne elencò quattro, ma confermò anche l'esistenza di particelle, di strutture particellari e di pori. Nonostante una formale adesione ad una chimica di principi, Barchusen si muoveva nel mondo dell'esperienza armato di spiegazioni meccaniche. Riteneva che i vari movimenti e la «conformatio mecanica» delle particelle fossero le cause delle azioni chimiche, che i *principia* dei composti fossero totalmente ignoti e che quelli ottenuti per scomposizione fossero solo corpi composti. Nel *Compendium* di Barchusen (come pure nei suoi *Elementa chemiae* del 1718) la definizione di principio e i principi chimici elencati non sono operativi: particelle e sostanze concretamente ottenute in laboratorio

(che sono però sempre composte) sono i reali principi del mutamento chimico.

Nel 1732 apparvero gli *Elementa chemiae* del grande medico e botanico olandese Herman Boerhaave (1668-1738), un manuale che esercitò una notevole influenza sulla nascita della chimica come scienza fisico-quantitativa. Al nome di Boerhaave non è legata nessuna specifica scoperta, ma il suo insegnamento medico e chimico ebbe un'influenza enorme e Albrecht von Haller lo definì «Communis Europae praeceptor». Boerhaave era sostenitore (in medicina e in chimica) della filosofia meccanica e atomistica (in medicina si sentiva erede di Borelli, Baglivi e Bellini): il vivente, l'organico erano per lui riconducibili al meccanico.

Per Boerhaave la chimica era un'arte in grado di insegnare la scomposizione dei corpi. Ma nelle scomposizioni il chimico non otteneva gli elementi di un corpo. Boerhaave recuperò in pieno le concezioni di Boyle, ammettendo come soli (eventuali) elementi o principi della materia le particelle o atomi. Nonostante che gli *Elementa* siano strutturati per sezioni dedicate ai quattro tradizionali elementi (aria, terra, acqua, fuoco) il medico olandese non credeva che l'arte chimica potesse ottenere, per analisi, i principi costituenti di un corpo. I risultati delle scomposizioni erano sostanze diverse da quelle che componevano un determinato corpo: erano *prodotti* degli strumenti di analisi usati dal chimico. La determinazione della elementarietà poteva eventualmente essere attribuita solo ai corpuscoli.

Negli *Elementa* Boerhaave dedica un'ampia trattazione ai problemi connessi alla natura del fuoco giungendo a risultati (qualitativi e quantitativi) che costituirono la base per la teoria settecentesca del fluido igneo imponderabile. Egli mette inizialmente in evidenza le difficoltà che si incontrano nel definire il fuoco, ricorre perciò ad un particolare procedimento empirico: individua nella capacità del fuoco di dilatare i corpi una proprietà distintiva dalla quale partire per individuarne le caratteristiche. Negli *Elementa* il fuoco si configura come un corpo sottile, un fluido imponderabile, capace di penetrare e di dilatare tutti i corpi della natura. Questo fluido igneo è presente in eguale quantità in tutta la natura ed è distribuito in maniera uniforme: gli effetti fisici da esso prodotti non dipendono quindi da una maggiore o minore quantità, bensì da un maggiore o minore movimento. I vari passaggi di stato di un corpo derivano da un contrasto tra il fuoco, che tende a separare le particelle della sostanza nella quale è inserito, e la materia che si oppone a questa separazione. Oltre al fuoco-calore Boerhaave ammetteva anche un alimento (un *pabulum*) del fuoco in grado di spiegare la formazione, durante le reazioni, di fuoco e di calore. Le diverse quantità riscontrabili nei vari processi chimici risultavano prodotte dai movimenti, dai rapporti esistenti tra il fuoco-elemento e il fuoco-alimento.

Le concezioni di Boerhaave ebbero un'eco profonda nella scienza sia grazie alla capillare diffusione dei suoi *Elementa*, sia grazie ad un testo come l'*Abregé de la Théorie Chymique. Tiré des propres Ecrits de M. Boerhaave* (1741) di Julien Offroy de La Mettrie. Il meccanicismo, il riduzionismo chimico-medico di Boerhaave e di Friedrich Hoffmann (1660-1742, professore di medicina ad Halle, autore di trattati sulla analisi delle acque minerali, sulla magnesia alba e fondatore dell'analisi chimica moderna) si posero in netto contrasto con il vitalismo e l'animismo di Georg Ernst Stahl (1659-1734), la cui opera chimico-medica costituì un punto di riferimento per gli sviluppi delle scienze naturali del Settecento. In aperta polemica con Boerhaave e Hoffmann (di quest'ultimo era collega ad Halle) Stahl ammetteva una distinzione netta tra anima e corpo, tra vivente e non vivente. Considerava i movimenti meccanici *strumenti* dei quali si serviva l'anima (agente in modo finalistico) per produrre effetti vitali. Il movimento non definiva la vita: era solo lo strumento dell'attività vitale. I meccanismi fisiologici erano subordinati, erano diretti da un agente immateriale. La visione stahliana della fisiologia è decisamente animistica: la *mixtio* di un corpo è diversa dalla sua vita; l'anima è l'elemento proprio dell'uomo, mentre il corpo è solo l'officina dell'attività dell'anima.

Stahl riteneva che la chimica dovesse venir considerata una scienza razionale ed indipendente, dotata di propri metodi e concetti e di un suo dominio specifico. Egli non polemizzò solo contro il riduzionismo dei meccanicisti, ma anche contro gli alchimisti e i paracelsiani. A suo parere l'uso principale delle conoscenze chimiche non era quello farmaceutico: i risultati acquisiti dalla «vera» chimica dovevano servire a perfezionare la mineralogia, l'arte della distillazione e della produzione di liquidi per fermentazione, la fabbricazione del vetro, la metallurgia e numerose altre arti pratiche. Grazie a Stahl, la chimica si presentò come una scienza autonoma, utile, che doveva essere incoraggiata dai sovrani perché era qualcosa di radicalmente diverso rispetto ai pericolosi ed empi «sogni» degli alchimisti. Un'immagine vitalistica, pietistica dei processi vitali influenzò decisamente l'approccio di Stahl al mondo chimico. Egli non abbandonò la visione atomistica della materia, accettò ed usò i movimenti particellari, ma li ritenne incapaci di spiegare la varietà e la composizione delle sostanze. Le forme particellari utilizzate dal meccanicismo chimico erano solo dedotte, non osservate: fornivano criteri del tutto inadeguati per l'individuazione chimica delle sostanze. Stahl ebbe un'acuta consapevolezza del vicolo cieco nel quale era finita la chimica con la filosofia meccanica. Propose perciò il ritorno ai principi, agli elementi (intesi come portatori materiali di caratteristiche e qualità) della tradizione essenzialistica. Questo suo recupero non costituì, storicamente, un regresso, una nostalgica reintroduzione di concetti ormai

abbandonati. Stahl vide nei principi dotati di caratteristiche metafisiche i soli in grado di fondare una teoria, basata su esperienze concrete, che fornisse criteri chiari e non equivoci di individuazione delle sostanze.

La fonte delle sue concezioni fu un'opera del medico tedesco Johann Joachim Becher (1635-1682) dal titolo *Actorum Laboratorii chymici Monacensis* (1669) che Stahl ristampò nel 1703 con il titolo di *Physica subterranea*, corredandola di una lunga Appendice (lo *Specimen Beccherianum*).

Figlio di un pastore luterano Becher si era occupato attivamente di alchimia, di teoria linguistica e di chimica e aveva legato il suo nome a vari progetti tecnico-produttivi (fabbriche di seta a Vienna, ricerca dell'oro in Olanda, controllo delle miniere in Inghilterra). La sua opera risente fortemente dell'influenza della filosofia chimica paracelsiana. Egli credeva infatti all'analogia tra macrocosmo e microcosmo, alla trasmutazione dei metalli, alla generazione spontanea, alla crescita dei metalli nelle viscere della Terra, alla necessità che lo studio della natura iniziasse con una spiegazione chimica della creazione. Nella *Physica* l'interesse di Becher si concentrò sulla questione degli elementi del mondo «sotterraneo» (geocosmo). Per lui i principi fondamentali della mistione erano terra, acqua e aria. Sulla base della Bibbia assegnò un ruolo privilegiato alla terra in quanto elemento ipostatico. L'aria non era un effettivo elemento chimico, bensì uno strumento fisico e Becher rafforzò così la tradizionale ammissione della non reattività chimica dell'aria. La mistione dei corpi avveniva solo tra acqua e terra ed era triplice poiché si ammettevano varie specie di acqua e di terra. Nella *Physica* i corpi risultano formati da:

terra + acqua   acqua + acqua   terra + terra.

Il terzo tipo di mistione (terra + terra) dava vita alle rocce, ai minerali e ai metalli, cioè ai corpi sotterranei. Ma Becher ammetteva tre terre-principi e ciascuna di loro era associata a qualità specifiche: la terra vitrescibile (conferiva fusibilità, diafaneità); la terra pingue (portatrice del colore, dell'odore, dell'oleicità); la terra fluida (conferiva la malleabilità). La terra pingue era una sostanza oleosa, grassa e infiammabile e venne denominata da Becher zolfo *flogistòs* (il termine *flogistòn* era stato usato in precedenza da Sennert) perché ogni corpo combustibile doveva contenerla in quanto era la causa della sua infiammabilità.

Stahl ricercava una teoria che separasse la chimica dalla medicina e dal meccanicismo dei «fisici» e che fosse in grado di fondare un'autonoma arte chimica. Individuò tale teoria nelle concezioni di Becher. Non a caso lo *Specimen Beccherianum* divenne il veicolo privilegiato di diffusione della cosiddetta teoria del flogisto. Stahl accettò infatti la triplice divisione dell'elemento terra proposta da Becher e concentrò la sua attenzione sulla seconda terra che divenne il flogisto o principio infiammabile. Stahl vide nel

flogisto il principio più adatto al movimento igneo. Non si tratta di un semplice portatore della qualità combustiva perché la sua azione risulta più complessa. Una sostanza brucia se contiene flogisto e se è posta in contatto con un'altra capace di riceverlo: è sempre necessario un *medium* nel quale possano inserirsi le particelle del flogisto. Al loro passaggio si crea un movimento (calore) e si producono fiamma e fuoco. Il fuoco non è una materia assolutissima, il flogisto non è la pura materia del fuoco. Quando non si trova in una mistione, il flogisto non forma infatti né fuoco, né movimento calorico, ma si volatilizza sotto forma di particelle invisibili. Per Stahl l'arte chimica non era in grado di esibire questo principio da solo: la sua sottigliezza era tale che lo rendeva impercettibile ai sensi. La sua presenza era rivelata dagli odori, dai sapori perché il flogisto, in quanto terra pingue, era il portatore di queste qualità.

L'ammissione di un flogisto consentì a Stahl di formulare una teoria completa della «combustione». Stahl affermò ripetutamente che, attraverso l'esperienza, era possibile mostrare che il flogisto, proveniente dal carbone, rientra nelle calci metalliche rigenerando le loro proprietà originarie. La teoria della calcinazione-riduzione in termini di flogisto prevedeva:

1) metallo (terra + flogisto) sottoposto al fuoco = calce (terra − flogisto)

In questo caso il flogisto si disperde nell'aria.

2) calce + carbone = metallo (terra + flogisto del carbone)

I riferimenti stahliani alla «combustione» hanno per lo più attinenza con la questione della riduzione delle calci. Nella chimica del Seicento calcinare un metallo significava privarlo delle sue qualità note: varie ipotesi esplicative, come si è visto, erano state elaborate, ma restava difficile comprendere il processo inverso (la restituzione delle qualità). Stahl affermò che, durante la riduzione, il carbone cede alle calci metalliche il suo flogisto, il quale, riunendo le loro particelle, consente il recupero delle proprietà originarie. Di conseguenza la calcinazione divenne una privazione di flogisto e ogni reazione di combustione risultò uno scambio di principi: calcinazione, combustione e riduzione vennero considerate per la prima volta processi collegati tra loro. Nella determinazione di questa connessione è principalmente da vedere l'importanza dell'originaria teoria di Stahl.

Stahl considerò la materia come una struttura gerarchicamente complessa formata da *principia* (le tre terre e l'acqua di Becher), *mixta* (unioni di principi), *composita* (unioni di misti) e *aggregata*. L'acqua e la terra non erano solo principi, ma svolgevano, unitamente al fuoco e all'aria, anche il ruolo di *strumenti* fisici del mutamento chimico. Stahl rifiutò quindi gli elementi peripatetici privilegiando l'acqua e le terre di Becher, ma recuperò

fuoco, aria, acqua e terra sul piano della dinamica delle reazioni. I quattro *prima* aristotelici rimasero nel sistema stahliano quali agenti fisici capaci di favorire (con i loro movimenti particellari) le reazioni, e di conseguenza i mutamenti.

L'approccio qualitativo proposto da Stahl conobbe un'immediata fortuna perché il meccanicismo chimico aveva esaurito per molti naturalisti la sua funzione storica: in Stahl molti medici videro il «riformatore» del quale aveva bisogno la chimica per presentarsi come arte razionale ed utile. Ma le originarie concezioni di Stahl furono ben presto sottoposte a radicali revisioni perché la base empirica della scienza chimica si ampliò in una direzione inaspettata e certo non prevista da Stahl. La ricchezza dei fenomeni naturali richiese la creazione di nuove strutture interpretative che produssero una proliferazione di specifiche teorie flogistiche. L'originaria concezione di Stahl dovette dilatarsi fino a mutare quasi completamente aspetto.

BIBLIOGRAFIA

Testi

G. Dorn, *Clavis totius philosophiae chymisticae* [1567], in *Theatrum Chimicum*, Argentorati, Sumpt. Haeredum E. Zetznen, 1659.

J.R. Glauber, *Arca thesauris Opulentia, sive Appendix generalis Omnium Librorum hactenus editorum* [1658], Amstelodami, apud J. Janssenium, 1660.

N. Lémery, *Cours de chymie* [1675], Paris, 1682.

Studi

F. Abbri, *Elementi, principi e particelle. Le teorie chimiche da Paracelso a Stahl*, Torino, Loescher, 1980.

M. Boas, *Robert Boyle and the Seventeenth Century Chemistry*, Cambridge, Cambridge University Press, 1958.

A.G. Debus, *The Chemical Philosophy Paracelsian Science and Medicine in the Sixteenth and Seventeenth Centuries*, New York, Science History Publications, 1977, 2 voll.

P. Galluzzi, *Motivi paracelsiani nella Toscana di Cosimo II e di Don Antonio Dei Medici: alchimia, medicina «chimica» e riforma del sapere*, in *Scienze, credenze occulte, livelli di cultura*, Firenze, Olschki, 1982, pp. 31-62.

A.R. Hall, *La rivoluzione scientifica 1500-1800* [1954], Milano, Feltrinelli, 1976.

O. Hannaway, *The Chemists and the Word*, Baltimore, The Johns Hopkins University Press, 1975.

C. Meinel, *Der Begriff des chemischen Elementes bei Joachim Jungius*, in «Sudhoffs Archiv», LXVI, 1982, pp. 313-38.

H. Metzger, *Les doctrines chimiques en France du début du XVII^e^ à la fin du XVIII^e^ siècle* [1923], Paris, Albert Blanchard, 1969.

Id., *Newton, Stahl, Boerhaave et la doctrine chimique* [1930], Paris, Albert Blanchard, 1974.

R.P. MULTHAUF, *The Origins of Chemistry*, London, 1966.
W. PAGEL, *Paracelsus An Introduction to Philosophical Medicine in the Era of Renaissance*, New York-Basel, S. Karger, 1958.
W. PAGEL, *Joan Baptista Van Helmont Reformer of science and medicine*, Cambridge, Cambridge University Press, 1982.
J.R. PARTINGTON, *A History of Chemistry*, London, Macmillan 1961-70, 4 voll.
P. ROSSI, *Tradizione ermetica e rivoluzione scientifica*, in *Immagini della scienza*, Editori Riuniti, Roma, 1977, pp. 149-81.
F. SHERWOOD TAYLOR, *The Alchemists* [1952], London, Paladin, 1976.
C. WEBSTER, *From Paracelsus to Newton Magic and the Making of Modern Science*, Cambridge, Cambridge University Press, 1982 (tr. it.: Bologna, Il Mulino, 1984).

XIII. *Fisiologia e mondo della vita* (di Walter Bernardi)

1. Harvey e la crisi della fisiologia galenica. - 2. Descartes e il meccanicismo biologico. - 3. Iatromeccanica e iatrochimica. - 4. La nascita della microbiologia e la disputa sulla generazione spontanea.

1. *Harvey e la crisi della fisiologia galenica.*

L'idea tradizionale che la scienza moderna si sia organizzata sotto il segno di un rifiuto generalizzato di Aristotele non corrisponde alla realtà storica almeno per quanto riguarda le discipline mediche, biologiche e naturalistiche. Basterà soltanto ricordare che la botanica ricevette grande impulso da un aristotelico come Andrea Cesalpino (1519-1603), la zoologia venne impostata su basi moderne da scienziati che risentivano fortemente dell'influenza di Aristotele come Ulisse Aldrovandi (1522-1605), Konrad von Gesner (1516-1565) e Guillaume Rondelet (1507-1566), l'embriologia sperimentale venne ripresa in una prospettiva tipicamente aristotelica da Girolamo Fabrici d'Acquapendente (1537-1619). Infine la scoperta della circolazione sanguigna, che doveva rivelarsi il fondamento stesso della moderna fisiologia e l'inizio della medicina sperimentale, fu opera di un aristotelico dichiarato come William Harvey (1578-1657).

La medicina ufficiale che aveva dominato per tutto il Cinquecento la vita delle università europee era ancora fondata sui testi e l'autorità di Galeno. La rinascita dell'anatomia nelle università italiane del Cinquecento, legata all'opera e all'insegnamento di Andrea Vesalio (1514-1564), Realdo Colombo (1520-1559), Gabriele Falloppio (1523-1562), Girolamo Fabrici d'Acquapendente, Bartolomeo Eustachi (1510?-1574), non aveva intaccato la saldezza millenaria dell'edificio della fisiologia galenica. Pur essendo state apportate significative modificazioni di dettaglio, l'impostazione fisiologica di

tipo finalistico aveva continuato a dominare incontrastata. Spetterà a William Harvey, discepolo diretto di Fabrici ed erede della scuola anatomica padovana, il compito di proporre un nuovo modello di funzionamento dell'organismo che, associato al metodo della dissezione anatomica e della rappresentazione figurata del corpo umano introdotto da Vesalio, segnava una definitiva frattura con gli schemi dell'antichità ed apriva anche alla medicina la prospettiva della scienza sperimentale.

Nel sistema fisiologico galenico il funzionamento dell'organismo obbediva ad un modello di tipo triadico che individuava nel fegato, nel cuore e nel cervello i centri di produzione del sangue, del calore e degli spiriti animali indispensabili per la conservazione della vita. Per quanto riguarda le funzioni specifiche del cuore e del sangue, il punto di riferimento era costituito dall'affermazione di una diversità qualitativa tra sangue venoso (prodotto e distribuito dal fegato attraverso le vene) e sangue arterioso (elaborato nel ventricolo sinistro del cuore e diffuso attraverso l'aorta e le arterie). Rettificando l'opinione di Erasistrato di Ceo, Galeno aveva infatti riconosciuto che le arterie erano portatrici non solo di «aria» (come indica l'etimologia greca del termine) ma anche di sangue. Non essendo però riuscito ad immaginare un collegamento a livello tissutale tra il sistema venoso e il sistema arterioso, ed ignorando il transito polmonare del sangue, egli era giunto alla conclusione che l'unico punto di interconnessione possibile tra i due tipi di sangue fosse all'interno del cuore. Sulla base di queste premesse il sistema cardio-vascolare galenico risultava così congegnato: l'organo emopoietico per eccellenza è il fegato (che è anche l'organo primigenio dal punto di vista embriologico), il quale trasforma in sangue venoso, di colore scuro e pesante, il chilo proveniente dallo stomaco e dagli intestini. Dal fegato, il sangue viene distribuito attraverso la vena cava inferiore e superiore a tutte le parti del corpo allo scopo di assicurare il necessario nutrimento ai diversi organi. La vena cava ascendente versa il suo eccesso di sangue venoso nell'orecchietta destra del cuore; di qui, attraverso il ventricolo destro, la maggior parte di questo sangue viene inviata al polmone per la sua nutrizione. Ma una piccola porzione di esso perviene al ventricolo sinistro attraverso un passaggio laterale del setto intraventricolare del muscolo cardiaco che Galeno ritenne di individuare in una serie di piccolissimi fori invisibili. Nel ventricolo sinistro il sangue venoso subisce un'ulteriore elaborazione per effetto dell'aria proveniente dai polmoni attraverso l'arteria venosa e diventa sangue arterioso. Anche questo tipo di sangue, di colore rosso brillante e più leggero per la presenza di spiriti vitali, compie un percorso centrifugo verso la periferia del corpo grazie ad una specifica «vis pulsifica» di cui sono dotate le membrane delle arterie (cfr. fig. 1).

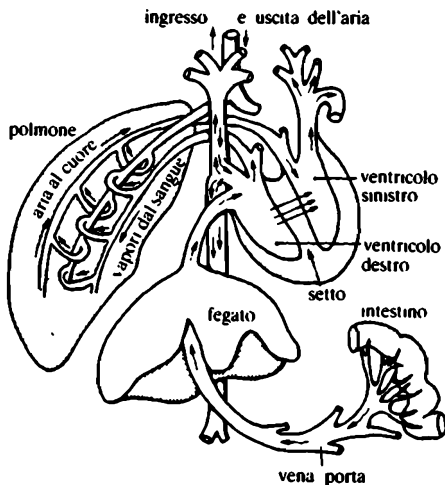



Figura 1. — Diagramma dell'azione del cuore e dei vasi sanguigni secondo Galeno.
Fonte R.S. Westfall, 1984, p 109

La funzione del cuore era per Galeno quella di produrre calore e spiriti vitali per l'organismo. Il calore veniva alimentato dall'aria proveniente dai polmoni e il cuore funzionava come una sorta di lucignolo del quale il sangue costituiva in un certo senso l'olio. In questo sistema fisiologico era ovviamente assente qualsiasi prospettiva di circolazione chiusa del sangue. Il torrente sanguigno aveva infatti una direzione centrifuga: partiva dal fegato e dal cuore per arrestarsi alla periferia del corpo. Qui esso veniva consumato in continuazione e nuovamente sostituito da altro sangue prodotto dal fegato. La distinzione qualitativa tra sangue venoso e sangue arterioso, se risultava preclusiva per ogni modello circolatorio, lasciava comunque presagire una concezione unitaria delle funzioni cardiaca e respiratoria che verrà invece lasciata cadere da Harvey. Galeno sembrava infatti aver individuato nel sangue arterioso una sostanza di tipo aeriforme che alimentava dentro il cuore un processo di combustione indispensabile per la produzione di calore organico, e nei polmoni i connessi strumenti di ventilazione e di espulsione dei residui fumosi prodotti dalla fiamma che ardeva dentro il cuore.

Questo schema della fisiologia cardio-vascolare, nel quale il senso comune e l'esperienza sembravano combinarsi in una sintesi di rara efficacia, resistette intatto fino all'inizio dell'epoca moderna quando venne demolito, non senza pervicaci e violente resistenze che si protrassero per tutto il Seicento, da William Harvey. Molti furono per la verità i precursori del

biologo inglese, i quali contribuirono con le loro scoperte e intuizioni a preparare la strada all'idea di una circolazione chiusa del sangue. In questo contesto un ruolo particolare venne svolto dal principio di un transito polmonare del sangue (la cosiddetta piccola circolazione), che riuscì a coesistere ancora per molto tempo con il modello galenico del «consumo» del sangue.

Il primo a sostenere l'idea del transito polmonare di tutto il sangue e a negare, di conseguenza, la realtà di un ipotetico passaggio intraventricolare fu il riformatore spagnolo Michele Serveto (1511-1553). Ma questa soluzione comparve all'interno di un ponderoso trattato teologico, intitolato *Christianismi Restitutio* (1553), che fu condannato e bruciato sul rogo insieme al suo autore, per cui è facile immaginare che le uniche tre copie scampate al fuoco ebbero un ruolo piuttosto marginale nella storia della scoperta della circolazione sanguigna. È improbabile che Harvey avesse potuto leggere il libro o ne conoscesse il contenuto. Di ben altro rilievo fu invece il contributo della seconda edizione del celebre trattato anatomico di Andrea Vesalio, il *De humani corporis fabrica* (1543), anche se i dubbi che vi venivano avanzati sull'esistenza di un percorso intraventricolare del sangue non comportavano l'indicazione di uno schema fisiologico alternativo a quello galenico. Un esplicito rapporto tra la negazione dei pori intraventricolari e il transito polmonare del sangue si troverà solo nel *De re anatomica* (1559) di Realdo Colombo, successore di Vesalio nella cattedra di anatomia a Padova. Ma anche in questo caso rimaneva del tutto assente l'idea di una circolazione chiusa del sangue. Colombo si limitava a rettificare marginalmente la teoria del consumo del sangue negli organi periferici del corpo, proponendo, anche per quella parte di sangue venoso che perviene al ventricolo sinistro del cuore per essere trasformata in sangue arterioso, la soluzione del transito polmonare piuttosto che quella del passaggio attraverso i misteriosi pori di Galeno.

L'attacco decisivo alla fisiologia galenica non giunse direttamente dall'anatomia, ma piuttosto dalla filosofia, nel caso specifico da una grande ripresa dei principi e dei metodi della tradizione aristotelica. L'adesione alle prospettive del vitalismo naturalistico di Aristotele non solo non era, nel caso di Harvey, un segno di arretratezza culturale, ma non costituiva nemmeno (a differenza di quanto stava accadendo nello stesso periodo di tempo per la fisica aristotelica nell'ambito dell'astronomia) un freno allo sviluppo della conoscenza e della ricerca sperimentale. Questo poté avvenire perché Harvey seppe impiantare saldamente sulle speculazioni e i simboli della filosofia aristotelica gli strumenti metodologici della nuova scienza: l'osservazione anatomica appresa alla scuola padovana, la pratica della vivisezione, l'utilizzazione delle procedure quantitative che avevano già dato i primi

risultati positivi nelle scienze fisiche. In questo modo, nonostante i radicati legami col passato, l'*Exercitatio anatomica de motu cordis et sanguinis in animalibus* (1628) finì per apparire un'opera rivoluzionaria e profondamente innovativa per le stesse applicazioni pratiche della medicina. E tale in effetti fu, anche senza pretendere di occultare nell'esaltazione della modernità di Harvey la forte presenza di motivi ed eredità aristoteliche. Riconoscere la distanza che separa Harvey dai suoi predecessori non significa, evidentemente, separare artificiosamente gli aspetti scientifici del suo pensiero dai risvolti più tipicamente filosofici o mistico-speculativi, ma cercare di giungere ad un'interpretazione globale della sua opera che ci restituisca — secondo le indicazioni di Walter Pagel — lo Harvey storico, che fu *insieme* uno scienziato moderno e un filosofo aristotelico.

Per Galeno esistevano due indipendenti percorsi del sangue e degli spiriti vitali che facevano riferimento il primo al fegato e il secondo al ventricolo sinistro del cuore. Con Harvey questi due percorsi venivano identificati in un unico, identico circuito sanguigno. In questo modo scompariva la dualità di centri di produzione e di diffusione del sangue, così come ogni distinzione qualitativa tra sangue venoso e sangue arterioso. Il principio harveiano della circolazione si opponeva in modo radicale alla vecchia concezione della diffusione del sangue verso la periferia e del suo consumo all'interno dei vari organi, perché presupponeva che la massa sanguigna conservasse ininterrottamente la sua natura e ritornasse con un percorso ciclico al suo centro di spinta e di rigenerazione. Ma nello stesso tempo il *De motu cordis et sanguinis* segnava una notevole discriminante anche con le intuizioni di quei numerosi filosofi e scienziati rinascimentali, come Giordano Bruno, Girolamo Cardano, Andrea Cesalpino, Michele Serveto, che avevano prefigurato la possibilità di una circolazione polmonare, perché solo ora veniva ammesso per la prima volta che questo era il percorso normale e valido per tutta la massa del sangue per passare dalla rete dei vasi venosi a quella dei vasi arteriosi.

Il trattato anatomico di Harvey è diviso in due parti, forse scritte in periodi differenti: la prima dedicata al moto del cuore, la seconda al moto del sangue. Anche la prima parte contiene elementi teorici rivoluzionari al pari di quelli, più noti, della seconda. Decisiva appare, in particolare, la spiegazione del fenomeno della pulsazione del cuore e delle arterie. Harvey sostituisce all'idea galenica di una «facoltà pulsante» insita nel cuore e nelle pareti delle arterie il principio di un impulso fisico-meccanico impresso al sangue dalla contrazione del cuore. Questo significa che le arterie si dilatano per effetto dell'afflusso di sangue, e non si riempiono di sangue perché si sono dilatate sotto l'azione di una facoltà vitale. Il vero movimento del cuore consiste, in definitiva, nella sistole, e non nella diastole come pretendeva Galeno.

Secondo la nuova impostazione fisiologica di Harvey il sangue tenderebbe ad accumularsi al centro dell'organismo, dove si trova la fonte di calore e di vitalità, se non intervenisse un impulso proporzionato in senso centrifugo. Il cuore è lo strumento muscolare che imprime questa spinta al sangue.

Il ricorso al modello della macchina nell'ambito dei fenomeni biologici è stato, ovviamente, uno degli aspetti «moderni» del pensiero harveiano sul quale ha maggiormente insistito la storiografia di ispirazione positivistica. Tuttavia non è forse superfluo notare che l'immagine del cuore come una pompa idraulica compare solo nelle *Praelectiones anatomiae universalis* (un manoscritto di lezioni di anatomia che Harvey tenne nel 1616 e negli anni seguenti al Royal College of Physicians di Londra), mentre risulta scomparso dal testo definitivo del *De motu cordis*. Nel complesso dell'opera harveiana questi spunti di carattere meccanicistico risultano abbastanza marginali rispetto ad un'impostazione teorica spiccatamente vitalistica. Il cuore non viene infatti presentato semplicemente come un muscolo che spinge il sangue nelle arterie: in realtà esso è la «fonte stessa della vita» e il «lare dell'organismo» da cui tutti gli organi ricevono «nutrimento, calore, vitalità» (Harvey 1963, 59).

Il passaggio dalla prima alla seconda parte del *De motu cordis et sanguinis* è costituito dai capitoli sesto e settimo, nei quali Harvey stabilisce il principio del transito polmonare del sangue dalle vene alle arterie. Basandosi sull'osservazione anatomica di organismi dotati di un solo ventricolo, come i pesci, Harvey si era convinto che la presenza di un secondo ventricolo nel cuore era legata direttamente al funzionamento dei polmoni. In questo modo semplice e naturale si spiega come il sangue possa passare dalla parte destra alla parte sinistra del cuore senza bisogno di ricorrere all'ipotesi fantastica dei pori intraventricolari. A questo punto, ormai giunto al capitolo nono, Harvey si pone la domanda decisiva: qual è la quantità e la provenienza del sangue che attraversa il ventricolo sinistro e viene spinta lungo le arterie? Lo scienziato inglese si rendeva perfettamente conto che questi erano «argomenti del tutto nuovi ed insoliti» nel contesto delle tradizionali discussioni sul problema del moto del sangue, e proprio per questo lo preoccupava seriamente la probabilità di attirarsi «non la malevolenza di qualcuno soltanto, ma l'odio addirittura di tutti» (Harvey 1963, 57). Ma ormai il dado era tratto, e non restava che confidare sull'amore per la verità e sull'onestà dei filosofi.

La scoperta della circolazione del sangue non fu la conseguenza di un sistema di osservazioni ed esperimenti, ma — per ammissione dello stesso Harvey — prese all'inizio la forma di un'intuizione o «sospetto» che solo in seguito risultò confermato da una serie coordinata di prove sperimentali. La prima fase della ricerca fu una riflessione («ho a lungo meditato») sulla

quantità di sangue spinto dal cuore per unità di tempo e sulla sua provenienza. Dall'impossibilità di conciliare i due fattori dell'enorme quantità di sangue che scorre nei vasi e della brevità del tempo richiesto per la sua trasmissione dalle vene alle arterie con l'ipotesi tradizionale dell'origine del sangue dalla trasformazione del cibo e del suo continuo consumo, Harvey era giunto alla conclusione che, se non si ammetteva il principio della circolazione, le vene avrebbero dovuto restare vuote e le arterie scoppiare per l'eccessiva immissione di sangue. In questa fase preliminare Harvey aveva pertanto cominciato a «riflettere se mai potesse sussistere una sorta di moto circolare». Solo «più tardi» riuscirà a dimostrare che quella intuizione era esatta (Harvey 1963, 58).

Qual è precisamente la natura e l'origine di questa intuizione? Harvey non avrà difficoltà a confessare di essere rimasto affascinato dall'ipotesi della circolazione del sangue perché essa era legata al principio aristotelico, e poi rinascimentale, della perfezione del moto circolare e dell'analogia tra macrocosmo e microcosmo. Ricorrendo alla simbologia del cerchio per spiegare la funzione del cuore e del sangue, egli finiva così per proiettare uno degli aspetti fondamentali della fisiologia animale sullo sfondo della cosmologia aristotelica. Anche nel microcosmo degli esseri viventi, come nelle orbite dei pianeti e nel ciclo ricorrente delle stagioni, il cerchio diventava simbolo di perfezione e di vita. Ma dopo le suggestioni dell'analogia e della filosofia che caratterizzano il celebre capitolo ottavo del trattato harveiano, inizia immediatamente la fase serrata e rivoluzionaria della dimostrazione scientifica. Se le immagini del cuore come Sole e principe dell'organismo attestano l'origine speculativa e misticheggiante della nuova teoria della circolazione, esse non riescono comunque ad influenzare l'esattezza delle scoperte anatomiche e il rigore dei procedimenti logici e sperimentali. In questo modo Harvey portava a compimento l'eccezionale impresa di resuscitare la fisiologia cardiocentrica di Aristotele e di farne il fondamento della medicina e della biologia moderne. Il modello circolare non era stato certo inventato da Harvey , ma Harvey fu incontestabilmente il primo a rendere operativa questa intuizione filosofica sul piano scientifico. La fisiologia moderna nacque da questo suggestivo intreccio di vecchio e di nuovo.

La dimostrazione della circolazione del sangue si basa su due prove fondamentali. La prima consiste nel calcolo della quantità di sangue che il cuore spinge nell'aorta per unità di tempo. Considerando la capacità del ventricolo sinistro, il ritmo delle pulsazioni e la velocità di scorrimento, risulta una cifra che supera di gran lunga non solo la quantità di sangue necessaria alla nutrizione del corpo, ma soprattutto quella che potrebbe essere fornita dal fegato grazie alla trasformazione del cibo. Tutto questo dimostra, secondo Harvey, che il sangue non può avere altra origine che da se

stesso, vale a dire circola in continuazione passando dal sistema venoso a quello arterioso e viceversa. Questa conclusione appare avvalorata anche dalla constatazione che l'incisione di una piccola arteria comporta in breve tempo la fuoriuscita di tutto il sangue, mentre l'osservazione di qualsiasi cadavere rivela l'assenza di sangue nella parte sinistra del cuore e nelle arterie. La seconda prova è basata sul metodo delle legature vascolari e serve ad evidenziare il fatto che il sistema venoso costituisce il naturale percorso di ritorno del sangue al cuore. Se si sezionano pesci e serpenti e si legano le vene al di sotto del cuore, si osserva infatti che esso si svuota rapidamente. Se si legano invece le arterie, il cuore si congestiona. Nel primo caso la morte sopravviene per mancanza di sangue nel cuore, nel secondo per eccesso.

Il transito dalle vene alle arterie avviene attraverso la cosiddetta circolazione polmonare. Questo fatto era stato provato sperimentalmente da Harvey nella parte iniziale del *De motu cordis et sanguinis*. Ma come avviene il passaggio dalle arterie alle vene indispensabile per completare il circolo? Harvey ricorre all'ipotesi di anastomosi tra i capillari delle due reti vascolari a livello periferico, ma in questo caso poteva disporre solo di prove indirette. In primo luogo la tecnica della legatura degli arti, se si applicava l'accorgimento di variarne l'intensità. Se infatti la legatura non è molto stretta, il sangue arterioso riesce a passare oltre l'ostruzione, mentre quello venoso si accumula al di sotto. Se invece è molto stretta, si arresta anche il flusso arterioso e la congestione avviene al di sopra della legatura. In secondo luogo Harvey dimostra la vera funzione delle valvole delle vene, numerose soprattutto negli arti inferiori ed analoghe a quelle del cuore, e riesce a farne un ulteriore elemento di conferma della direzione centripeta del flusso venoso. La scoperta di queste valvole unidirezionali risaliva al maestro padovano di Harvey, Girolamo Fabrici d'Acquapendente. Ma l'anatomista italiano, che era ancora sostanzialmente legato all'autorità di Galeno, non era riuscito a comprendere che la loro funzione era quella di impedire il riflusso del sangue verso la periferia del corpo; riteneva al contrario che servissero a ritardare il flusso sanguigno verso le estremità.

Il *De motu cordis et sanguinis* si chiude con una nota di rinnovato misticismo in cui vengono celebrate, contemporaneamente, la gloria di Aristotele e la preminenza del cuore. Harvey dischiude per un momento una prospettiva embriologica inedita nelle discussioni sul moto del sangue, rinviando esplicitamente alle osservazioni sullo sviluppo embrionale che verranno rese pubbliche vent'anni dopo nel *De generatione animalium* (1651). Il cuore appare come il centro dell'organismo anche perché, come aveva affermato Aristotele, esso è epigeneticamente il primo organo che si forma e si rende visibile nel corso dell'embriogenesi. Il cuore si configura, in questo senso, come «il fondamento della vita» e «il signore di tutto ciò che è

connesso alla vita», finendo per assumere la dignità e le funzioni del Sole che governa il sistema dei pianeti e del re che rappresenta l'unità del corpo sociale. Per questo Harvey lo definisce «il Sole del microcosmo», così come il re è «il cuore dello Stato» (Harvey 1963, 3).

2. *Descartes e il meccanicismo biologico.*

La fisiologia galenica aveva subito, con la dimostrazione della circolazione del sangue, un colpo decisivo, come indica la violenta reazione del mondo scientifico e accademico europeo alla pubblicazione del *De motu cordis*. Ma per molti aspetti importanti, come il vitalismo e il finalismo, Harvey restava ancora legato al mondo ideale della scienza aristotelica e galenica. Solo con l'intervento di René Descartes (1596-1650) la cultura moderna riuscirà per la prima volta a definire, seppure in modo schematico e spesso ingenuo, una concezione complessiva dei meccanismi di sviluppo e di funzionamento degli organismi viventi che si contrapponeva *in toto*, sia per i risvolti teorici sia per l'impostazione metodologica, alla scienza antica e rinascimentale. Nonostante accanite resistenze di medici e scienziati conservatori, la filosofia aveva imposto alla biologia una svolta radicale, proponendo una nuova visione della natura e un modello di ricerca destinato ad influenzare in profondità le scienze della vita fino al Settecento per diventare infine, nel corso dell'Ottocento, una delle prospettive fondamentali dello sviluppo della scienza moderna.

Il meccanicismo biologico cartesiano rappresenta per lo storico uno degli esempi più clamorosi di quei sistemi filosofico-scientifici in cui la portata rivoluzionaria delle ripercussioni teoriche sembra accompagnarsi, in modo inversamente proporzionale, alla pressoché totale mancanza di contributi «positivi» all'accumularsi delle scoperte e delle conoscenze particolari. Anche per questi motivi, in aggiunta alle considerazioni già svolte nel cap. VIII, converrà ritornare, con maggior ampiezza, sull'argomento. Il programma scientifico delineato per la prima volta nel *Discours de la méthode* (1637) era fondato sulla convinzione che tutte le funzioni vitali degli organismi, anche le più complesse e indecifrabili, fossero in definitiva riconducibili a processi e relazioni di tipo fisico-meccanico. Esso rispondeva ad un bisogno razionale di comprensione delle misteriose forze della vita negandone, in pratica, ogni originalità e riassorbendole nell'ambito di tecniche di analisi e di controllo tipicamente «umane». Il principio dell'unità e dell'uniformità della natura, che d'ora in poi costituirà una delle grandi eredità del meccanicismo, aveva finito per fare della biologia e della medicina una semplice sezione della fisica, soggetta agli stessi procedimenti logico-matematici e alla stessa legalità scientifica. La potenza epistemologica del

modello della «macchina» organica sembrava in grado di risolvere nella chiarezza geometrica delle relazioni tra figure e movimenti la profondità misteriosa dell'interno dei corpi, dove la vista non penetra e nemmeno il coltello anatomico riesce a far luce. Solo l'intelletto, cioè l'unico elemento non meccanico presente nell'uomo, poteva sfuggire all'analisi scientifica. Ma, rinunciando allo spirito, la scienza poteva finalmente assoggettare al suo dominio il mondo della vita che il sapere rinascimentale aveva invano tentato di sondare con la potenza simbolica della parola o ricorrendo ad arcane analogie con il macrocosmo. La strada per risolvere la vita nell'organizzazione fisica dei corpi era ormai stata aperta.

Questo processo di desacralizzazione del sapere, reso possibile dal meccanicismo e dall'impostazione filosofica del dualismo cartesiano, permetterà (non senza gravi rischi e illusioni) una sostanziale emancipazione delle scienze della vita dalla metafisica e dal finalismo della tradizione naturalistica rinascimentale, e la contemporanea definizione di un loro spazio autonomo all'interno delle scienze della natura. La biologia tenta di organizzarsi come scienza tagliando le sue radicate connessioni col soprannaturale e analizzando i fenomeni vitali esclusivamente con l'ausilio di procedure naturali, che ricadano interamente nell'ambito della legalità e della ricerca positiva. Questa tendenza, sempre più accentuata tra gli scienziati seicenteschi, di evitare ogni implicazione teologica, e l'esplicita professione di agnosticismo filosofico che caratterizza il loro lavoro sperimentale, non appaiono però necessariamente legate ad una prospettiva materialistica e atea. Come nel caso di altre scienze, anche in biologia la grande maggioranza dei ricercatori vissuti tra Sei e Settecento sono credenti e rispettosi delle verità di fede. Essi sottolineano però la necessità di separare i fenomeni della vita dai dogmi religiosi, cercando di elaborare schemi di interpretazione della realtà indipendenti da ogni fondazione metafisica, ma risolvibili nella logica di procedimenti empirico-dimostrativi. A trarre i maggiori benefici di questa situazione storica saranno soprattutto la fisiologia e l'anatomia comparata, mentre l'embriologia meccanicista cartesiana (di cui ci occuperemo in un altro capitolo) andrà incontro in breve tempo ad uno smacco clamoroso, tanto più emblematico in quanto, negli stessi decenni, il cartesianesimo si apprestava a realizzare, soprattutto in Francia e in Olanda, la sua lenta conquista della filosofia e della cultura ufficiali.

Descartes non scriverà mai un trattato organico di biologia, anche se considerazioni generali ed osservazioni particolari si trovano diffuse in molte opere pubblicate in vita, a cominciare dal *Discours de la méthode*. Solo in due scritti pubblicati postumi, l'*Homme* (1662) e la *Description du corps humain* (1664), Descartes definirà con maggiore precisione i contorni della propria interpretazione dei fenomeni organici. Gran parte delle sue teorie fisiologi-

che erano comunque già state ampiamente divulgate dai cartesiani olandesi Henrich de Roy (Regius) e Cornelis Hooghelande. Tra le funzioni vitali, quelle che attireranno maggiormente l'attenzione di Descartes per la loro disponibilità ad una trattazione in senso meccanicistico, sono il sistema cardiocircolatorio, il movimento muscolare e l'apparato sensoriale.

Il modello fisiologico cartesiano è caratterizzato da un'impostazione fortemente sistematica ed unitaria. Esso individua nella fermentazione il fondamento termoregolante dell'intera macchina organica, nella circolazione sanguigna lo strumento meccanico della diffusione dell'energia vitale prodotta dal cuore, e nella teoria dell'automatismo animale la conseguente cornice filosofica generale. Descartes combina il principio della fermentazione, che era tipico delle ricerche chimiche, con la concezione tradizionale del cuore come fonte del calore vitale. La produzione di calore, nella quale si riassume l'essenza stessa della vita, non è comunque l'effetto e l'indizio dell'azione di uno specifico principio vitale, ma appare perfettamente riconducibile, secondo Descartes, a fenomeni di autocombustione normali nel mondo inorganico, come l'accensione del fieno umido e della calce viva, la fermentazione del vino, ecc. L'organismo vivente resta senza dubbio, anche in questa prospettiva, un congegno complesso e sofisticato, ma azionato da un solo tipo di energia e da un'unica forza propulsiva: il calore generato nella cavità del cuore.

Pur provenendo da uno scienziato non meccanicista, la dimostrazione compiuta da Harvey della circolazione sanguigna aveva costituito un fattore decisivo nella definizione della concezione meccanicista della vita. Se il cuore poteva essere considerato come una pompa funzionante sulla base delle modificazioni fisiche intervenute nel sangue (il quale, a sua volta, seguiva le leggi di tutti i fluidi inanimati), era sufficiente un solo atto di coraggio «filosofico» per affermare che anche le altre funzioni organiche erano semplici meccanismi automatici. L'integrale risoluzione del mondo vivente nelle forme dell'estensione e del movimento faceva sì che l'organismo potesse essere considerato, d'ora in avanti, alla stregua di un orologio o di qualsiasi altra macchina artificiale. La teoria della circolazione del sangue assume in questo contesto, insieme alla spiegazione del meccanismo psico-motorio, la stessa funzione paradigmatica che nella fisica del *Monde* era svolta dall'ottica. Descartes finirà per farne il modello esplicativo basilare di tutti i fenomeni di sviluppo e di funzionamento dell'organismo. La distillazione e la rarefazione che il sangue subisce nel cuore rende infatti ragione dei processi di digestione, di nutrizione, di appercezione e di movimento, di riproduzione e di sviluppo embrionale. Il sangue arterioso si dirige in tutte le parti del corpo, dove deposita le sue particelle e favorisce così l'accrescimento; alcune particelle più sottili giungono allo stomaco e determinano la cozione e

filtrazione dei cibi; altre, più vive e sottili, si dirigono verso il cervello, attraversano il filtro della ghiandola pineale e vanno a formare gli spiriti animali dai quali dipende il funzionamento dell'apparato sensoriale e motorio; altre particelle infine si concentrano negli organi riproduttivi e costituiscono il materiale seminale da cui si formerà, attraverso un processo epigenetico integralmente meccanico, un nuovo organismo.

Descartes riconobbe sempre a Harvey il merito di aver dimostrato per primo la circolazione del sangue, ma non esiterà a criticarlo vivacemente su alcuni aspetti particolari, tra i quali la spiegazione della contrazione muscolare riveste un interesse teorico fondamentale. Harvey aveva attribuito al cuore, come si è visto, una capacità pulsante autonoma. Questa soluzione appariva a Descartes troppo pericolosamente vicina alle spiegazioni vitalistiche tradizionali. Per questo egli proporrà un'interpretazione del battito cardiaco di tipo meccanicista, basata esclusivamente sulla struttura anatomica del cuore, sul calore e la natura del sangue. Essa individuava nella rarefazione del sangue, provocata dal calore della cavità cardiaca, la causa fondamentale della contrazione del muscolo. Il cuore svolge il compito passivo di un qualsiasi contenitore che viene sollecitato dalla espansione termica del sangue. In questo modo non c'era più bisogno di far intervenire facoltà o capacità vitali di qualsiasi genere. Quando il sangue venoso contenente il chilo elaborato dal fegato giunge nel ventricolo destro del cuore, il calore del «fuoco senza luce» che vi arde in continuazione produce, grazie ad una rapida accelerazione del moto delle sue particelle, una effervescenza e dilatazione del liquido. Una volta passato nei polmoni, questo «vapore» sanguigno si raffredda a contatto dell'aria e torna allo stato liquido. Quando rientra nella parte sinistra del cuore, esso appare come sangue arterioso, cioè più sottile e rarefatto, e solo in questa forma è adatto ad alimentare il calore vitale per trasmetterlo a tutte le parti dell'organismo.

Il problema delle funzioni senso-motorie degli esseri viventi viene trattato con particolare attenzione nell'*Homme*, la più completa tra le opere a sfondo biologico di Descartes. Uno degli aspetti cruciali della fisiologia meccanicista era quello di spiegare come l'anima spirituale potesse essere unita al corpo e influire su di esso, dal momento che nei processi fisici intervengono solo materia e movimento, e i fenomeni psicologici, inestesi, non possono agire sui fenomeni fisici, estesi. Per chi, come Descartes, non poteva accettare l'idea che l'anima facesse muovere direttamente il corpo, non restava che una soluzione meccanicisticamente corretta, quella degli «spiriti animali. Con questo concetto si intendeva comunemente in fisiologia un fluido estremamente vivace e sottile, prodotto dal cervello e trasmesso dai nervi fino ai muscoli, paragonabile a quello che oggi si potrebbe chiamare un impulso nervoso. La sede dell'anima e il punto di congiunzione col corpo veniva

individuato da Descartes nella ghiandola pineale, soprattutto per la sua posizione centrale all'interno del cervello e la errata convinzione che essa fosse assente negli animali. Quando la pressione di un oggetto esterno colpisce un organo di senso è come se un filo che scorre lungo il nervo venisse tirato. Questo provoca nella ghiandola pineale un movimento, il quale a sua volta suscita nell'anima una sensazione corrispondente. Reciprocamente l'anima può modificare lo stato della ghiandola pineale in modo da mettere in movimento, attraverso essa, gli spiriti animali. Questi scorrono lungo la rete dei nervi, giungono ai muscoli e producono una reazione appropriata alla sensazione iniziale (cfr. fig. 2).

Figura 2. — Tavola dell'*Homme* di Descartes in cui viene spiegato il meccanismo del riflesso senso-motorio. Le particelle del fuoco A agiscono sulla pelle B, tirano il filamento CC e aprono l'entrata del poro d e. Gli spiriti animali della cavità F passano attraverso il poro e scendono nei muscoli, provocando un'azione corrispondente alla stimolazione ricevuta dalla «macchina» organica.

Descartes si preoccuperà di precisare fin dall'inizio che la propria interpretazione delle funzioni psicologiche era valida per gli animali e la macchina corporea dell'uomo, e non comprendeva affatto i processi intellettivi propri dell'anima razionale. Ma la teoria dell'automatismo animale comportava pur sempre, anche in questa forma, notevoli implicazioni di ordine generale che finivano per reintrodurre la filosofia al centro della biologia. Di fronte alle soluzioni libertine che vedevano nel comportamento animale sostanziali analogie con quello umano, e quindi attribuivano l'anima anche alle bestie, Descartes tornava a separare drasticamente, in senso qualitativo, la percezione dalla coscienza. Ma il dualismo anima-corpo e la proposta degli animali-macchina, se apparivano funzionali agli interessi dell'ortodossia, rendevano abbastanza problematica l'interazione tra le due

sostanze separate, e finiranno anch'essi per prestarsi, nel corso delle battaglie ideologiche dell'età dei lumi, ad utilizzazioni in senso materialistico.

3. *Iatromeccanica e iatrochimica.*

Se la fisiologia cartesiana non aveva apportato sul piano pratico contributi specifici (salvo forse la nozione di riflesso), l'affermazione del modello della macchina organica aprirà alle scienze biologiche un periodo di grandi entusiasmi e di febbrili ricerche. In pochi decenni venne praticamente riscritta l'anatomia del corpo umano: particolarmente innovativi, in questo contesto, risultarono gli studi degli inglesi Thomas Wharthon (1614-1673) che formulò la teoria delle ghiandole come organi secretori (*Adenographia universalis*, 1656), e di Thomas Willis (1621-1675) che indagò la struttura del sistema nervoso (*De cerebri anatome*, 1664). Un impulso notevole allo sviluppo della biologia venne dato, tra l'altro, dalla possibilità di impostare l'analisi del mondo vivente in una prospettiva che incoraggiava rapporti di integrazione tra ricerche di fisiologia, anatomia, meccanica, chimica e matematica.

Il meccanicismo aveva favorito, nella prima metà del Seicento, la risoluzione scientifica di grandi funzioni organiche come la circolazione sanguigna. Analoghi progressi furono realizzati anche nella conoscenza del sistema linfatico. Gli antichi avevano ritenuto che i prodotti della digestione giungessero al fegato e al sangue attraverso le vene mesenteriche. Ma la scoperta dei vasi chiliferi e della circolazione della linfa - che si immette nel sistema venoso presso la vena cava - dette un contributo decisivo, in seguito alle ricerche di Gaspare Aselli (1581-1625) e di Jean Pecquet (1622-1674), alla definitiva eliminazione del mito galenico della centralità del fegato.

Se il principio cartesiano dell'animale-macchina rimarrà la caratteristica peculiare della scienza seicentesca, più appropriato in ogni caso alle discussioni filosofiche che alle ricerche sperimentali, i fisiologi meccanicisti mostreranno uno spiccato interesse soprattutto per lo studio di funzioni specifiche dell'organismo vivente, in particolare quelle che si prestavano maggiormente ad una risoluzione di tipo geometrico. Il problema del movimento muscolare finì così per assumere un ruolo preponderante all'interno della biologia meccanicista. Il contributo più importante in questo settore giunse dal capolavoro postumo del matematico e fisico napoletano Giovanni Alfonso Borelli (1608-1679), il *De motu animalium* (1680-1681). Allievo di Benedetto Castelli a Roma e professore di matematica a Messina e a Pisa, Borelli fu il protagonista indiscusso di quel processo di estensione del galileismo dalla matematica alle discipline medico-biologiche che è tipico della scienza italiana della seconda metà del Seicento. La considerazione

quantitativa dei fenomeni metabolici e fisiologici, che aveva avuto una significativa interpretazione nel *De statica medicina* (1614) di Santorio Santorio (1561-1636), si andrà costituendo in un programma di ricerca sulla meccanica animale che, dopo gli spunti contenuti nei *Discorsi e dimostrazioni matematiche* di Galileo, verrà sistematicamente sviluppato nel *De motu animalium*. Il progetto teorico borelliano, omogeneo ma indipendente dalla biologia cartesiana, si caratterizza per un'impronta di tipo strutturalistico, in cui la ripresa di moduli meccanici e l'uso di procedure dimostrative matematiche appare finalizzata all'ideale di una spiegazione fisiologica concepita nei termini di un'interazione di particelle elementari, secondo gli indirizzi della fisica corpuscolare che era stata diffusa in Europa attraverso il *Syntagma philosophicum* (1658) di Pierre Gassendi (1592-1655).

Borelli si era già distinto prima del *De motu animalium*, oltre che per i notevoli studi di meccanica e fisica celeste, per uno dei più lucidi manifesti teorici dello iatromeccanicismo, il *Delle cagioni delle febbri maligne della Sicilia negli anni 1647 e 1648* (1649). In quest'opera la patologia solidistica e localistica ispirata alla filosofia meccanico-atomista — che individuava le cause delle malattie in una lesione organica provocata da un agente fisico esterno e riscontrabile nell'esame autoptico del cadavere — segnava una delle sue prime vittorie sulla medicina umoralistica della tradizione galenica. Parafrasando la celebre affermazione di Galileo sulla struttura matematica dell'universo, nel *De motu animalium* Borelli tenterà di estendere anche al mondo degli esseri viventi e dei meccanismi del loro funzionamento e della loro riproduzione il metodo della dimostrazione geometrico-deduttiva. I risultati più duraturi saranno ottenuti nella spiegazione della contrazione muscolare, in cui la riduzione geometrica del rapporto tra muscolo tendine e osso ad un sistema di leve e contrappesi consentiva effettivamente di risolvere molti problemi legati alle funzioni del camminare, del sollevamento di pesi, del nuoto e del volo. Meno efficace risulterà invece la spiegazione fisica del funzionamento del muscolo. Tradizionalmente si era sempre pensato che i muscoli si contraessero perché si gonfiavano per effetto della trasmissione attraverso i canali nervosi degli spiriti animali. Questa teoria era stata però criticata dal danese Niels Stensen (1638-1686), che nel *De musculis observationum specimen* (1664) e poi nell'*Elementorum myologiae specimen* (1667) aveva interpretato il lavoro muscolare come una contrazione meccanica dei fasci di fibre. Per una soluzione ispirata alla chimica aveva invece optato l'inglese Thomas Willis, che nel *De cerebri anatome* aveva fatto riferimento ad una sorta di «esplosione» derivante dall'incontro, dentro il muscolo, delle particelle degli spiriti animali e delle particelle salino-sulfuree del sangue arterioso. Proprio alle suggestioni di Willis si ispirò Borelli quando sostenne che se il muscolo si contrae deve necessariamente

aumentare la propria massa. Questo fenomeno, solo apparente, come aveva osservato Stenone, veniva spiegato dal fisiologo napoletano come la conseguenza di una reazione chimica, supponendo che un liquido risultante dall'ebollizione del sangue alcalino e del succo nervoso acido si interponesse tra le fibre come un cuneo.

All'opera di Borelli e all'insegnamento di Galileo si richiamerà l'anatomista bolognese Marcello Malpighi (1628-1694), una delle personalità più rappresentative della biologia meccanicista seicentesca, che insegnò a lungo medicina nelle università di Bologna, Pisa e Messina prima di terminare la sua carriera come archiatra di papa Innocenzo XII. Per lo scienziato meccanicista trovare un modello meccanico adeguato ai fenomeni della natura vivente significava, in sostanza, comprenderlo scientificamente nella sua essenza, cioè ricondurlo a quei parametri di risoluzione teorica che funzionavano nelle scienze naturali. Malpighi applicò con grande maestria questo ideale filosofico alla struttura latente della macchina organica attraverso il metodo dell'«anatomia artificiosa e sottile». In essa la combinazione delle tecniche più avanzate dell'artificio anatomico (essiccamento, cottura dei reperti, ecc.) e dell'analisi microscopica veniva finalizzata alla realizzazione del principio meccanicista che individuava nella contessura elementare degli organi la ragione ultima delle funzioni fisiologiche e della stessa patologia medica. Alle istanze metodologiche della filosofia meccanica, in particolare al postulato dell'uniformità della natura, si richiamava anche l'uso del cosiddetto «microscopio naturale» che permetteva di risolvere i problemi più complessi dell'anatomia e della fisiologia dell'uomo e degli animali superiori mediante lo studio delle stesse funzioni in organismi più semplici, come gli insetti e gli anfibi. La perfetta padronanza di queste metodologie, accompagnata da notevoli capacità di rigore sperimentale e di manualità anatomica, consentì a Malpighi di raggiungere traguardi impensabili fino a quel momento per le scienze biologiche seicentesche, che non di rado rimasero insuperati fino all'Ottocento. Con il *De pulmonibus* (1661) riuscì a completare il ciclo storico della scoperta della circolazione sanguigna, dimostrando il carattere alveolare del tessuto polmonare e l'esistenza di una rete capillare anastomatica tra arterie e vene. Questi risultati furono confermati, qualche anno dopo, dal microscopista olandese Antony van Leeuwenhoeck (1632-1723), il quale riuscì a descrivere i globuli rossi e constatò *de visu* il movimento del sangue nei capillari della coda di un girino. Risultati di pari importanza scientifica verranno conseguiti da Malpighi anche nei settori della neurologia (*De lingua*, 1665, *De externus tactus organo*, 1665, *De cerebro*, 1665), dell'adenologia (*De viscerum structura*, 1666, *De structura glandularum conglobatarum*, 1689), dell'ematologia (*De polypo cordis*, 1666), dell'entomologia (*De bombyce*, 1669) e dell'anatomia vegetale (*Anatomes*

plantarum, 1675-1679). Alcune di queste ricerche saranno in seguito riprese e sviluppate da alcuni discepoli diretti di Malpighi. In particolare Lorenzo Bellini (1643-1704) verificherà la validità del modello meccanico della secrezione ghiandolare nel *De renibus* (1662), e Giovanni Battista Morgagni (1682-1771) trarrà spunto dalla difesa della medicina razionale per rivelarsi, ormai in pieno Settecento, il fondatore della moderna anatomia patologica con il suo celebre *De sedibus et causis morborum* (1761).

Il progetto di una meccanizzazione della fisiologia animale, perseguito con particolare coerenza da Descartes e Borelli, aveva rivelato notevoli possibilità di realizzazione pratica nel campo della circolazione sanguigna e delle funzioni legate al movimento muscolare. Ma nell'indagine di altri processi fisiologici, come la digestione e la respirazione, appariranno più funzionali le prospettive teoriche della tradizione iatrochimica. L'idea che esistesse una conformità tra i fenomeni chimici e quelli fisiologici, che si riassumeva nell'identificazione dell'organismo con una macchina chimica, affondava le sue radici addirittura nella scienza galenica ed era stata rilanciata con grande clamore in epoca moderna da Paracelso e da Johann Baptista van Helmont (1579-1644). Ma i primi esperimenti chimici sugli organismi viventi — dai quali sarebbe scaturita la moderna biochimica — potevano aprire nuove, importanti prospettive di ricerca solo quando la chimica fosse riuscita a liberarsi faticosamente dalle suggestioni animistiche di impalpabili «fermenti» ed «archei». L'affermazione da parte di Helmont di una sostanziale diversità tra le trasformazioni chimiche proprie degli organismi viventi e le reazioni che avvengono *in vitro* non favoriva certamente, nel caso specifico della digestione, l'avvio di un'indagine che fosse in sintonia con l'impostazione razionalistica della scienza seicentesca. Anche quando, per merito soprattutto del celebre professore di medicina dell'Università di Leida Franz de la Boë (1614-1672), più noto come Sylvius, questa distinzione cadde e venne frettolosamente teorizzata l'integrale riduzione dell'organismo ad un congegno chimico, la sperimentazione diretta non fece molti passi avanti in mancanza di appropriati strumenti e di competenze specifiche per un'analisi di laboratorio. Per il momento, il trasferimento alla fisiologia della digestione delle rudimentali conoscenze di chimica inorganica disponibili si tradusse in generiche affermazioni di principio che si contrapponevano sterilmente a quelle dei ricercatori di scuola iatromeccanica, i quali attribuivano la digestione ad un processo di triturazione dei cibi effettuato dai muscoli dello stomaco. Nemmeno i primi isolati tentativi di realizzare un esperimento di digestione artificiale, come quello compiuto dal medico olandese Reinier de Graaf (1641-1673) con il prelevamento di succo pancreatico da un cane sottoposto a vivisezione, riusciranno a chiarire i termini esatti del problema. Com'è noto, solo nella seconda metà del Settecento venne effettuata per la

prima volta, grazie alla genialità e all'audacia sperimentale di Lazzaro Spallanzani, una vera e propria digestione artificiale e si poté stabilire definitivamente che la causa di questo processo doveva essere attribuita a specifici succhi gastrici prodotti dallo stomaco.

Orizzonti di più ampio respiro storico verranno aperti dalla iatrochimica nello studio della respirazione, dove la nascente chimica sperimentale riuscì a conseguire i suoi primi, incerti successi. L'idea che la respirazione fosse un fenomeno analogo alla combustione era abbastanza tradizionale, dato che risaliva addirittura a Galeno. Da tempo era anche nota l'osservazione che la vita e la fiamma non possono resistere a lungo in un ambiente chiuso nel quale venga a mancare l'aria. Ma perché si giungesse alla formulazione della teoria secondo la quale nell'aria è presente una frazione attiva, indispensabile sia per la respirazione sia per la combustione, fu necessario rimuovere preliminarmente gli ostacoli teorici che ancora si frapponevano all'affermazione della nuova visione meccanicista e atomista della natura. Singolarmente, le maggiori resistenze che questo programma di ricerca dovette superare provenivano proprio dallo scienziato che aveva dato un contributo decisivo al superamento della fisiologia galenica, cioè William Harvey. Com'è noto l'autore del *De motu cordis et sanguinis* non aveva affrontato il problema della diversità tra sangue venoso e sangue arterioso — anzi aveva asserito che la loro composizione era identica e le variazioni di colore puramente accessorie — non solo per difendere il principio della circolazione chiusa, ma anche per liberare la nuova fisiologia cardio-vascolare dall'ingombrante retaggio degli spiriti vitali della tradizione galenica. Diffidando di ogni applicazione della chimica alla biologia ed essendo pregiudizialmente contrario alle filosofie atomistiche, Harvey si trovò così impreparato ad affrontare il mistero della respirazione. Eppure era proprio sulla funzione respiratoria che la sua dimostrazione della circolazione sanguigna esercitava gli effetti più rivoluzionari, dal momento che per la prima volta veniva stabilita la necessità di un transito polmonare per tutta la massa sanguigna. Se l'aria non penetrava più nel sangue per produrre all'interno del cuore gli spiriti vitali, quale poteva essere il suo scopo? Costretto a separare in funzione anti-galenica la respirazione dalla circolazione, Harvey ammetterà l'esistenza, dentro il sangue, di un «calore innato» di intonazione vitalistica, che la respirazione provvedeva semplicemente a raffreddare in funzione delle esigenze dell'organismo.

Spetterà ad un gruppo di giovani medici e scienziati inglesi raccolti intorno all'Università di Oxford il compito storico di scindere la teoria harveiana della circolazione sanguigna dalla filosofia della natura aristotelica e vitalistica in cui si era definita, e trasferirla all'interno della nuova concezione atomistica e chimica della vita. Solo in virtù di questa operazione

teorica, e grazie al contributo sperimentale di un gruppo particolarmente affiatato di biologi e fisico-chimici, la fisiologia seicentesca riuscì ad avvalersi positivamente dell'apporto delle scienze della natura.

Il primo passo fu quello di reintrodurre su basi sperimentali l'ipotesi (galenica) che l'aria penetrasse attraverso i polmoni dentro il sangue. Questo risultato fu la conseguenza di un eccezionale susseguirsi di esperimenti e di riflessioni collettive. Robert Boyle (1627-1691) rivelò nei suoi *New experiments physico-mechanicall touching the spring of air and its effects* (1660) di essere riuscito a dimostrare, mediante l'impiego di una pompa a vuoto opportunamente modificata in modo da contenere oggetti e piccoli animali, che una fiamma, un uccello e un topo morivano pressoché contemporaneamente se veniva progressivamente tolta l'aria. L'esperimento in realtà non dimostrava *ipso facto* che era la mancanza d'aria la causa vera della morte. Si poteva infatti sempre pensare, in una prospettiva meccanicista, che la morte dipendesse dall'arresto della circolazione sanguigna dovuto alla mancata ventilazione dei polmoni. Qualche anno dopo Robert Hooke (1635-1703) rese noto nella *Micrographia* (1665) un interessante esperimento di vivisezione, in cui un cane era stato mantenuto in vita nonostante il collasso polmonare grazie all'accorgimento di pompare aria nei polmoni con un soffietto. Questo esperimento, ripetuto con maggiore accuratezza alla Royal Society nel 1667, decise definitivamente tra l'interpretazione meccanica e quella chimica della respirazione. Mediante la tecnica dell'insufflazione polmonare, Hooke era infatti riuscito a mantenere costantemente dilatati i polmoni, facendo in modo che il sangue venisse ugualmente a contatto dell'aria anche in assenza di movimento toracico. In queste condizioni l'animale era perfettamente in grado di sopravvivere. Questo fatto indicava in modo inequivocabile che la respirazione svolgeva una funzione essenziale per la vita. Restava però da spiegare come faceva l'aria a entrare nel sangue e che ruolo preciso svolgeva.

Scartata l'ipotesi tradizionale della produzione degli spiriti vitali, la nuova filosofia atomistica della materia contribuì in modo decisivo ad imporre l'idea che l'aria trasmettesse agli esseri viventi uno «spirito nitroso» o «nitro aereo», cioè un sale volatile di cui il salnitro che provoca l'esplosione della polvere da sparo è una fissazione, indispensabile per alimentare il calore organico. La posizione di Harvey era stata rovesciata. Dato che i gas possono sciogliersi dentro i liquidi, tornava praticabile il progetto di un sistema fisiologico unitario che, come quello galenico ma in alternativa ad esso, spiegasse contemporaneamente le funzioni della circolazione e della respirazione. Thomas Willis fornì ai fisiologi di Oxford lo schema chimico indispensabile per uniformare i processi della combustione e del metabolismo. Nel *De fermentatione* e nel *De febribus* (1658) aveva infatti sostenuto

che qualsiasi tipo di calore si poteva spiegare come un moto violento di particelle sulfuree. Nel cuore esisterebbe un fermento nitro-sulfureo che, venendo a contatto col sangue, libererebbe le particelle spiritose, sviluppando così un processo di fermentazione capace di produrre il calore necessario al corpo. Sul tema della fermentazione le discussioni sarebbero continuate a lungo, ma il principio di una combustione fisiologica innescata dall'aria si poteva ormai considerare acquisito.

Per tutta la seconda metà del Seicento il problema delle relazioni tra aria, respirazione e combustione continuerà ad attirare l'attenzione degli ambienti scientifici che gravitavano intorno alla Royal Society. Nel 1669 Richard Lower (1632-1691), un medico della scuola di Oxford noto per i suoi esperimenti di trasfusione del sangue, pubblicò un *Tractatus de corde* in cui veniva per la prima volta dimostrato sperimentalmente che l'aria assorbita nei polmoni è la causa diretta della mutazione di colore che si verifica nel sangue durante il passaggio dalle vene alle arterie. Questa ipotesi venne confermata *in vitro* quando, riprendendo un'intuizione del biologo italiano Carlo Fracassati, si poté constatare che mescolando in un recipiente sangue venoso e aria atmosferica, quest'ultimo assumeva rapidamente il colore purpureo del sangue arterioso.

Rimaneva ancora da spiegare, una volta appurato che a livello polmonare si verifica una reazione chimica che modifica la natura del sangue, di che tipo fosse il processo inverso che ritrasforma nei tessuti il sangue arterioso in sangue venoso, e soprattutto dove avveniva realmente la produzione del calore corporeo. In questo caso, però, la ricerca medico-fisiologica si trovò ad urtare senza successo per molto tempo ancora con le rudimentali cognizioni di chimica inorganica disponibili. Un risultato di grande significato ideale e scientifico si poteva comunque già considerare fin da quel momento acquisito. Il cuore aveva definitivamente perso, a favore del sangue, la sua mitica funzione di produttore di calore e di vita e diventava un semplice muscolo come gli altri.

I *Tractatus quinque medico-physici* (1674) di John Mayow (1641-1679), un medico e chimico che spesso è stato presentato come un precursore di Lavoisier, rappresentano in un certo senso il punto di approdo della tradizione fisiologica oxoniense. Mayow dimostrò, con un esperimento veramente ingegnoso, che solo una frazione dell'aria atmosferica veniva assorbita dal sangue e serviva effettivamente alla produzione di calore. Mise prima una candela e poi un topolino in una coppa di vetro rovesciata, che immerse in una tinozza d'acqua uniformando il livello dei due liquidi. Poté in questo modo constatare che quando la candela si spense e il topolino morì, il livello dell'acqua contenuta nella coppa era salito, dimostrando così che l'aria interna aveva perso parte della sua elasticità.

Mayow attribuì il fenomeno al consumo delle particelle nitrose dell'aria per effetto della combustione. Siccome anche la respirazione produceva lo stesso effetto, pareva logico dedurne che anch'essa fosse un processo di combustione che utilizzava le particelle nitro-aeree. Queste particelle, introdotte nell'organismo mediante la respirazione e la circolazione sanguigna, venivano ormai considerate da quasi tutti i fisiologi indispensabili al mantenimento della vita e alla stessa motilità muscolare perché, combinandosi con le particelle sulfuree diffuse dalla rete dei nervi, apparivano in grado di produrre il calore e il movimento necessari. Il concetto harveiano di un «calore innato» nel sangue era stato definitivamente sostituito dall'intuizione, suffragata da un ampio supporto sperimentale, che l'organismo fosse una specie di macchina termica. Anche se espressa attraverso principi piuttosto vaghi come quelli di «fermentazione» e di «particelle nitro-aeree», questa idea era ormai alla portata delle scienze fisico-organiche. Ma solo l'avvento della chimica pneumatica, quasi un secolo dopo, avrebbe permesso di risolvere questo aspetto cruciale della fisiologia animale.

4. *La nascita della microbiologia e la disputa sulla generazione spontanea.*

La consapevolezza di una sostanziale inadeguatezza tra l'occhio dell'uomo e la realtà, e la conseguente acquisizione dell'esistenza di livelli di organizzazione vitale che sfuggono al controllo sensoriale, dettero, com'è noto, un contributo rilevante alla generale reimpostazione del problema della collocazione dell'uomo nell'universo che era iniziato con la rivoluzione astronomica. Questo processo sembrò addirittura precedere nel tempo la diffusione dell'uso del microscopio ed appare strettamente legato all'ipotesi dell'origine parassitaria delle malattie infettive. Un'opera pionieristica venne svolta in questo campo dal medico ed umanista veronese Girolamo Fracastoro (1483-1553), che con il suo trattato *De contagione et contagiosis morbis et curatione* (1546) segnò una tappa decisiva nella storia dell'epidemiologia e della biologia microscopica. Per la prima volta veniva infatti affermato con chiarezza che le malattie infettive non erano provocate dalla corruzione degli umori bensì da un contagio vivente, precisamente da «seminaria» e «virus» invisibili che si riproducono passando da un soggetto all'altro.

Le intuizioni preveggenti di Fracastoro non erano il frutto di indagini microscopiche. L'uso di questo fondamentale strumento scientifico, di cui pure si avevano notizie generiche da molto tempo, cominciò a diffondersi tra gli scienziati e i filosofi solo nel corso del Seicento. Spesso la descrizione della struttura intima di oggetti di uso comune o di piccoli esseri viventi, a cui si dedicarono lo stesso Galileo e altri scienziati della cerchia di Lincei come

Giovanni Faber, Fabio Colonna e Francesco Stelluti, obbediva a sollecitazioni dilettantesche di curiosità e di meraviglia per i misteri del creato. Ben presto però l'applicazione sistematica e rigorosamente programmata dell'indagine microscopica avrebbe finito per determinare una rivoluzione profonda negli indirizzi e nelle stesse procedure metodologiche delle scienze della vita.

Gli spunti di carattere epidemiologico di Fracastoro vennero ripresi nel corso del Seicento soprattutto dal gesuita tedesco Athanasius Kircher (1602-1680), spirito enciclopedico di grande levatura e professore di matematica al Collegio Romano. Anche se permeati da un misticismo fantasioso e poco controllato che suscitò forti critiche da parte di Francesco Redi, gli studi di Kircher costituiscono in pratica l'atto di nascita della microbiologia sperimentale. Questa volta era stato infatti l'intervento decisivo del microscopio a generare nell'osservatore la convinzione che l'aria, l'acqua e la terra brulicassero di una quantità prodigiosa di «seminaria» e «vermiculi» di ogni genere e forma che si riproducevano velocemente nelle sostanze in putrefazione. La presenza di questi «minutissima animalcula» anche nei liquidi organici degli ammalati convinse Kircher che la stessa peste, la quale aveva infierito con particolare virulenza a Roma nel 1656, aveva un'origine parassitaria. Egli si mise perciò alla ricerca consapevole, nei cadaveri degli appestati, di questi agenti patogeni, finché ritenne di averli individuati in un microscopico «pestiferum virus» che passerebbe da un individuo all'altro attraverso la respirazione e per mezzo di veicoli animati (mosche) o inanimati (cibi, vestiti, ecc.).

Il vero fondatore della parassitologia sperimentale fu il medico e naturalista aretino Francesco Redi (1626-1698). Redi si rivelò l'interprete più prestigioso di un programma di ricerca biologica distinto e per certi aspetti antagonistico, pur nella comune eredità galileiana, rispetto a quello di tipo fondamentalistico portato avanti da Borelli e da Malpighi. Più attenta agli aspetti empirici della realtà e alla descrizione dei caratteri macroscopici e comportamentali degli organismi che alle implicazioni strutturalistiche dei processi fisiologici, la storia naturale di Redi apparve in questo senso più compatibile, nei suoi risvolti ideologici, con gli apparati tradizionali del sapere. Nelle sue *Osservazioni interne agli animali viventi che si trovano negli animali viventi* (1684) egli si preoccupò di ricercare e descrivere, anche con l'aiuto dei discepoli Giovanni Caldesi e Pietro Paolo da Sangallo, ogni genere di parassiti appartenenti all'uomo, agli uccelli, ai rettili, ai pesci, ai molluschi, prestando estrema attenzione all'interpretazione del loro ciclo vitale, dei rapporti intrattenuti con gli organi infestati e delle alterazioni patologiche provocate negli organismi parassitati.

La vittoria più clamorosa che la parassitologia seicentesca riuscì ad

ottenere fu senza dubbio la precisa individuazione della patogenesi della scabbia. L'esistenza dei «pellicelli» era ormai nota da tempo, così come era stato individuato dai medici il rapporto tra la presenza dei pellicelli, l'emergenza sulla pelle delle caratteristiche pustole e la diffusione del prurito. Ma fu solo nel 1687, quando comparvero le *Osservazioni intorno a' pellicelli del corpo umano* scritte in collaborazione dal medico del bagno penale di Livorno Giovanni Cosimo Bonomo (1663-1696) e dallo speziale Giacinto Cestoni (1637-1718) e riviste direttamente dallo stesso Redi, che venne istituita una connessione diretta tra la riproduzione degli acari e la diffusione della malattia. Occorrerà più di un secolo e mezzo perché la scienza ufficiale riconoscesse la giustezza di questa eziologia della scabbia, che rivoluzionava completamente le tradizionali spiegazioni di tipo umoralistico e determinava la nascita di un nuovo indirizzo nella terapia delle malattie contagiose.

La contemporanea scoperta delle uova degli acari della scabbia e la conseguente negazione della generazione *ex putri* dei parassiti dette, tra l'altro, un valido contributo anche alla grande battaglia condotta da Francesco Redi contro la diffusa credenza nella generazione spontanea degli insetti e degli organismi inferiori, che risaliva ad Aristotele e veniva difesa dalla stessa Chiesa. Le *Esperienze intorno alla generazione degl'insetti* (1668) segnano, com'è noto, una pietra miliare nella storia della biologia, non solo per l'audacia con cui veniva demolito uno dei miti tradizionali del pensiero antico e medievale, ma soprattutto per l'estrema lucidità e il rigore metodologico con cui erano stati programmati, eseguiti e controllati gli esperimenti. Il metodo sperimentale aveva fatto ormai il suo ingresso anche nelle scienze della vita. Spinto dall'ansia di verificare se fosse vero oppure no che «ogni fracidume di cadavere corrotto, ed ogni sozzura di qualsiasi altra cosa putrefatta, ingenera i vermini e gli produce» (Redi 1668, 86), Redi non esitò a interrogare con ogni mezzo la natura per ottenere una risposta che non lasciasse possibilità di dubbio. L'*experimentum crucis*, nel quale veniva introdotto per la prima volta il metodo comparativo mediante l'uso sistematico di campioni di controllo, fu eseguito utilizzando otto flaconi riempiti di varie specie di carne, di cui quattro vennero lasciati all'aria aperta e gli altri quattro furono sigillati ermeticamente. Il risultato fu inequivocabile: solo i primi reperti, nei quali le mosche avevano potuto posarsi sulla carne, dettero origine a larve che poi si svilupparono in mosche identiche alle altre. La carne dei flaconi sigillati divenne anch'essa putrida e si decompose, ma senza dar luogo a nessuna forma di vita. Il genio sperimentale di Redi non si contentò, comunque, di questo risultato. Le condizioni in cui erano stati eseguiti l'esperimento di ricerca e quello di controllo non erano infatti perfettamente identiche, dato che nei flaconi sigillati era stato impedito il contatto dell'aria, e qualcuno poteva eccepire — come di fatto avvenne —

sulla legittimità delle conclusioni teoriche. Ripeté l'esperimento chiudendo i flaconi con della garza invece di sigillarli. In questo modo l'aria poteva arrivare a contatto della carne, ma non le mosche che continuarono ad aggirarsi inutilmente sul coperchio. Ancora una volta dalla sostanza organica putrefatta non si generarono larve. La conclusione aveva un carattere storico: «Non invermina adunque animale alcuno che morto sia» (Redi 1668, 95).

Il pregiudizio della generazione spontanea appariva sconfitto dalla dimostrazione sperimentale che ogni essere vivente può nascere solo da un altro essere vivente della stessa specie. Ma il peso della tradizione restava ancora molto forte, tant'è vero che lo stesso Redi sembrava convinto che le galle delle foglie di quercia fossero prodotte dall'anima vegetativa della pianta. Solo l'intervento risolutivo dell'*Anatomes plantarum* (1679) di Marcello Malpighi riuscirà a farlo ricredere e ad accettare il dato di fatto che le galle costituivano un'alterazione patologica del tessuto vegetale prodotta dall'immissione di un uovo di insetto che successivamente si sviluppa in larva.

All'eredità scientifica di Malpighi e di Redi si riallaccerà una delle figure più interessanti della scienza italiana del primo Settecento, Antonio Vallisneri (1661-1730), autore di importanti contributi nei settori dell'entomologia, dell'elmintologia e dell'embriologia. Proprio per controbattere gli argomenti di quegli avversari di Redi che imputavano alla mancanza di circolazione dell'aria la sterilità dei flaconi sigillati, Vallisneri intraprese una serie di esperienze che pubblicò nel *Della curiosa origine e degli sviluppi e de' costumi ammirabili di molti insetti* (1696). Constatò in questo modo che dalle uova degli insetti nascevano larve normali anche in recipienti in cui non c'era abbastanza aria per consentire la sopravvivenza delle mosche adulte, e che le stesse larve riuscivano a svilupparsi perfettamente purché la chiusura ermetica venisse aperta appena un po' mediante alcuni piccoli fori. Le esperienze di Redi conservavano quindi intatto tutto il loro valore storico: gli insetti potevano nascere solo da uova deposte da altri insetti, senza che la putredine o l'aria influissero in modo determinante nel fenomeno.

L'effetto della dimostrazione di Redi, se si rivelò decisivo per escludere la possibilità della generazione spontanea dal mondo degli insetti, fu comunque notevolmente sminuito dalla pressoché contemporanea scoperta dei protozoi e dei batteri da parte del naturalista olandese Antony van Leeuwenhoeck (1632-1723). Piccolo funzionario pubblico ma geniale costruttore di lenti e insaziabile curioso di ogni aspetto della natura, questo anonimo cittadino di Delft che non viaggerà mai al di fuori del suo paese, non conosceva il latino e fu incapace per tutta la vita di scrivere un vero trattato scientifico, lascerà un'impronta indelebile nella storia del pensiero e delle scienze biologiche del XVII e del XVIII secolo.

Scrutando al microscopio l'acqua di uno dei tanti laghetti vicini a Delft,

Leeuwenhoeck scoprì con meraviglia, nel corso dell'estate 1674, una miriade di piccoli organismi viventi — si trattava di Protozoi — che egli considerò subito «animaletti microscopici» sostanzialmente analoghi per struttura e funzioni a tutti gli altri Metazoi. Avevano colori e dimensioni diverse, e si muovevano spontaneamente come nel loro ambiente naturale. Apparivano dotati di un corpo globulare e di una lunga coda con la quale si spostavano agilmente, come il microscopista olandese ebbe modo di constatare in seguito, in ogni genere di liquidi: nell'acqua piovana, di fiume, di pozzo, di mare, e nelle infusioni di sostanze vegetali. La straordinaria scoperta fu resa nota al mondo scientifico internazionale con una lunghissima lettera di ben 17 pagine in folio, datata 9 ottobre 1676 e indirizzata al segretario della Royal Society di Londra, Henry Oldenburg. La sua pubblicazione parziale sulle «Philosophical Transactions», uno dei periodici ufficiali della scienza europea del tempo, segnò in pratica l'inizio della storia della protozoologia e della batteriologia.

L'uomo moderno veniva posto improvvisamente di fronte all'esistenza, sperimentale e non più immaginifica, di mondi viventi sconosciuti e inafferrabili dai sensi, all'idea di una sterminata diffusione della vita e di un'inesauribile capacità creativa della natura. Nuovi e inquietanti interrogativi si ponevano alla scienza e alla filosofia: che cosa sono questi «animalculi» invisibili che popolano tutti gli elementi e sembrano moltiplicarsi ad un ritmo vertiginoso? Come si riproducono? A cosa servono? Come spiegare questa enorme proliferazione della vita nel creato? Il microscopio rendeva ormai ineluttabile una profonda revisione dell'immagine della realtà e della collocazione dell'uomo nella natura.

Il fantasma della generazione spontanea, appena pochi anni prima esorcizzato da Redi, tornava con le scoperte di Leeuwenhoeck ad aleggiare minaccioso sulla comunità scientifica, pur essendo ormai confinato nel mondo dell'infinitamente piccolo. In questo ambito le esperienze di Redi non avevano nessuna efficacia — né fu possibile fino alla metà del Settecento individuare procedure dimostrative specifiche —, e così si assistette negli ultimi anni del Seicento ad un baldanzoso ritorno dei vecchi avversari del naturalista toscano. In questa battaglia antimodernista, che ideologicamente era di retroguardia ma riusciva abilmente a servirsi delle acquisizioni più avanzate della ricerca scientifica contemporanea, si distinse soprattutto il gesuita romano Filippo Bonanni (1638-1725). Dotato di apprezzabili doti di osservatore, di cui dette prova in un libro intitolato *Micrographia curiosa* (1691), egli descrisse numerosi esempi di protozoi e tentò di ridare vigore all'antica dottrina secondo la quale la putrefazione di sostanze organiche poteva produrre spontaneamente le forme di vita più elementari. I tempi non sembravano però sensibili a questo tipo di dispute. Il mistero dell'origine

della vita divenne il terreno preferito delle controversie filosofiche e teologiche, e solo in pieno Settecento la questione della generazione spontanea tornerà ad essere di attualità scientifica.

BIBLIOGRAFIA

Testi

W. HARVEY, *Opere*, a cura di F. Alessio, Torino, Boringhieri, 1963.
F. REDI, *Esperienze intorno alla generazione degl'insetti*, Firenze, Per Piero Matini, all'insegna della Stella, 1668.

Studi

E.J. DIJKSTERHUIS, *Il meccanicismo e l'immagine del mondo dai Presocratici a Newton*, Milano, Feltrinelli, 1971.
C. DOBELL, *Antony van Leeuwenhoeck and his «Little Animals»*, London, J. Bale & Danielsson, 1932.
R.G. FRANK JR., *Harvey e i fisiologi di Oxford. Idee scientifiche e relazioni sociali*, Bologna, Il Mulino, 1983.
A.R. HALL, *Da Galileo a Newton (1630-1720)*, Milano, Feltrinelli, 1973.
G. MONTALENTI, *Storia della biologia e della medicina*, in AA.VV., *Storia delle scienze*, a cura di N. Abbagnano, Torino, UTET, 1962, vol. III, tomo I.
W. PAGEL, *Le idee biologiche di Harvey Aspetti scelti e sfondo storico*, Milano, Feltrinelli, 1979.
G. PENSO, *La conquista del mondo invisibile Parassiti e microbi nella storia della civiltà*, Milano, Feltrinelli, 1973.
R.S. WESTFALL, *La rivoluzione scientifica del XVII secolo*, Bologna, Il Mulino, 1984.

XIV. *L'esplorazione del «largo pelago»: elettricità, magnetismo, calore, luce* (di ENRICO BELLONE)

1. *I misteri dell'ambra, gli effluvii e la virtù che muove i pianeti.*

Il Seicento vede il trionfo della fisica del moto, il progresso delle scienze matematiche e la spiegazione newtoniana del sistema dei pianeti e delle comete. Un trionfo, un progresso e una spiegazione che tracciano, per noi, un disegno particolare della ragione scientifica. Il disegno, infatti, agevolmente si innesta entro una raffigurazione della conoscenza che ci è vicina nel tempo, seguendo la quale rivediamo alle nostre spalle un passato che, senza anomalie eccessive, si configura come un «precorrimento» della nostra epoca. Ciò che nel Seicento sembra invece uscire dalla cornice in cui, per abitudine o per pigrizia del senso comune o per insufficienze filosofiche e storiche, crediamo di poter collocare Galilei o Newton, si ristruttura come qualcosa di sostanzialmente erroneo: una discussione secolare sugli effluvii emanati da una calamita naturale o l'impossibilità di osservare un fenomeno di polarizzazione ci possono anche apparire come degni d'un catalogo di tramontate ingenuità.

Se cedessimo alla tentazione di compilare quel catalogo cadremmo tuttavia nell'illusione secondo la quale la scienza del Seicento è solo quella che ritroviamo, in forme corrette e raffinate, nei manuali delle scuole d'oggi. Anche i nostri manuali diventerebbero illusori e fuorvianti, però, in quanto ci regalerebbero soltanto dei resoconti apologetici e deformi di quella rivoluzione scientifica. La rivoluzione scientifica riuscì a imporsi non solo grazie ai teoremi di Galilei sulla caduta dei gravi, o alla trattazione matematica delle ellissi planetarie scoperte da Keplero e assoggettate alla gravitazione da

Newton, ma anche grazie alle discussioni sulle virtù dell'ambra, ai paradossi dell'ottica, alle questioni non risolte della termologia, ai misteri del magnetismo, all'inesplicabilità della luce emessa dal fosforo mercuriale, alle contraddizioni che animarono la ricerca scientifica nel suo faticoso tentativo di passare all'osservazione di nuovi regni della natura e alla misurazione di grandezze difficili da definire. Quando Lorenzo Magalotti (1637-1712), attorno alla metà del secolo, compilò i *Saggi di naturali esperienze*, già erano presenti i segni di una separazione tra la meccanica, la matematica e l'astronomia da un lato, e il resto dei fenomeni naturali dall'altro: una separazione che s'approfondì ulteriormente durante il Settecento e che aveva radici non tanto nell'esistenza faticosa di scienze di per sé deboli, quanto nelle enormi difficoltà che si incontravano quando si cominciava l'esplorazione del «largo pelago» che secondo Magalotti si stendeva di fronte a chi voleva capire i fatti dell'elettricità ma che, in effetti, conteneva in sé tutti i regni della natura, anche se molti nutrivano la speranza che la matematizzazione del moto, la crescita delle osservazioni e l'invenzione di congetture su fluidi ed emanazioni avrebbero infine portato a una riunificazione del cosmo su fondamenta solidamente meccaniche. Le scienze dell'elettricità, del magnetismo o del calore non erano deboli, come potrebbe sembrare da un superficiale confronto con le vittorie della meccanica o dell'astronomia. Erano invece scienze che stavano analizzando sistemi più complessi di quelli che caratterizzavano l'orbita di un pianeta. Prima di spiegare quei sistemi, era necessario coglierne la complessità, e rendersi conto che essa era maggiore di quanto la fantasia potesse tentare di prevedere.

Se i pianeti non sono incastonati nelle immense sfere cristalline dell'antica astronomia, ma orbitano attorno al Sole su traiettorie i cui parametri sono calcolabili, è allora necessario scoprire quale virtù motrice stia alla base del moto planetario. È una necessità che Keplero (v. in questo volume il cap. VI) avverte e che pone problemi difficili. Keplero ritiene, nei primi anni del Seicento, che quei problemi siano formulabili e solubili partendo dall'ipotesi che la virtù motrice che regge il moto planetario sia una *species* immateriale emanata dal Sole, in parte analoga alla luce e, come quest'ultima, capace di propagarsi nello spazio. Nell'*Astronomia Nova*, pubblicata nel 1609, Keplero afferma che la virtù motrice è magnetica, e che il corpo del Sole è magnetico e ruota su se stesso «*in loco*». La concezione del magnetismo che è presente nell'*Astronomia Nova* parla di una virtù attrattiva che è propria del magnete e che è collocata all'interno di una certa zona circostante il magnete stesso: al di là di una certa distanza l'azione della virtù è pressoché nulla. Una situazione del tutto analoga è presente, secondo Keplero, nello spazio che contiene il sistema dei pianeti. La virtù che abbraccia e muove questi ultimi si propaga in cerchio attorno al Sole, e si indebolisce nelle zone più lontane dal

centro. Nell'*Astronomia Nova* questa analogia tende a porre i primi elementi di una spiegazione fisica dei moti celesti, a partire da un'altra analogia che William Gilbert, nell'opera *De magnete* pubblicata nel 1600, aveva pensato di poter stabilire tra i magneti e il pianeta Terra. Keplero, che cita esplicitamente Gilbert e le sue ricerche, già da alcuni anni studia i fenomeni trattati nel *De Magnete*. In una lettera del 1603 egli scrive infatti di star lavorando da tempo sulle esperienze eseguite da Giambattista della Porta, di aver individuato gli errori commessi da quest'ultimo e di essere d'accordo con Gilbert sulla necessità di riflettere sul fatto che, come il ferro è mosso da un magnete, così un magnete è mosso dalla Terra (Koyré 1966, 348-349).

La trattazione di Gilbert esercitò un ruolo importante nel Seicento. Giustamente Joseph Priestley, nella seconda metà del Settecento, scrisse che l'autore del *De Magnete* «può essere effettivamente chiamato il padre della moderna elettricità, anche se è vero che egli lasciò un figlio in tenerissima età» (J. Priestley 1767, I, 6-7). Malgrado la qualitatività delle sue spiegazioni, Gilbert, come s'è visto, fu un punto di riferimento per Keplero. Anche Galileo Galilei, d'altra parte, ritenne doveroso affrontare i temi del *De Magnete*, discutendone nel *Dialogo*. Gli effetti della calamita aprono, secondo Galilei, «gran campo di filosofare», anche se quel campo non è ancora illuminato dal ragionamento matematico: «quello che avrei desiderato nel Gilberti, è che fusse stato un poco maggior matematico, ed in particolare ben fondato nella geometria, la pratica della quale l'avrebbe reso men risoluto nell'accettare per concludenti dimostrazioni quelle ragioni ch'ei produce per vere cause delle vere conclusioni da sé osservate» (Galilei, E.N. VII, 432).

L'osservazione di Galilei è stata qui citata per esteso in quanto essa è rivelatrice di una situazione problematica importantissima, la quale ci riporta a quelle difficoltà di cui già s'è detto all'inizio del presente capitolo. È infatti lecito chiedersi per quali motivi esista, nei primi anni del Seicento, una disparità notevole tra le teorie e le misure relative all'astronomia e alla meccanica da un lato, e quelle relative ai fenomeni elettrici e magnetici dall'altro. Keplero, che usa strumenti matematici potenti e che può fondare i calcoli sulle misure astronomiche di Tycho Brahe, non può nello stesso tempo superare, per quanto riguarda la sua fisica magnetica dell'attrazione tra il Sole e i pianeti, il livello dell'analogia qualitativa tra la virtù motrice del sistema planetario e le idee di Gilbert. E così Galilei, che lavora su un programma di matematizzazione della teoria del moto, non può far altro che ammirare l'ingegnosità del *De Magnete* ma criticarne le lacune in campo dimostrativo. Il rapporto tra le conclusioni osservate e le cause dei fenomeni, scrive Galilei, è carente nell'opera di Gilbert, in quanto è discusso senza matematica. Dove stanno i motivi di una simile differenza tra lo sviluppo

dell'astronomia e della meccanica da un lato, e la crescita della scienza sperimentale sull'elettricità e sul magnetismo dall'altro lato?

Invano cercheremmo quei motivi nella sola letteratura scientifica e filosofica del Seicento. Basta ripercorrere alcuni testi, quale ad esempio la *Philosophia magnetica* che Niccolò Cabeo (1596-1650) fece pubblicare a Ferrara nel 1629, per comprendere che gli ostacoli che stanno di fronte alla costruzione di una teoria matematica basata su informazioni quali quelle catalogate da Gilbert non dipendono solamente dall'impreparazione matematica degli scienziati. Cabeo è costretto a studiare Gilbert e a criticarne le opinioni su un terreno non profondamente diverso da quello in cui il medico della regina Elisabetta si era mosso tre decenni prima. Anche Cabeo fa esperimenti con il versorio, in un oceano di deboli attrazioni. Anche Cabeo vuole distinguere con nettezza gli effetti elettrici da quelli magnetici, lungo la direttrice già seguita da Cardano e da Gilbert. Anche Cabeo, come Gilbert, ha il problema di accettare o meno l'esistenza di effetti repulsivi in elettricità: da una parte egli respinge l'idea del *De Magnete* sugli umori acquosi, dall'altra, però, pur accogliendo l'ipotesi che il magnetismo discenda da una simpatia, egli deve mettere in discussione l'attrazione elettrica in termini che implicano il concetto di vuoto, secondo uno schema che in parte attrasse anche l'attenzione di Galileo. Forse l'attrito esercitato su un corpo elettrico provoca un'espansione dei pori di quest'ultimo, così facilitando l'uscita di effluvii sottili che a loro volta generano variazioni nella densità dell'aria circostante. Ma egli osservò anche, in forme inattese, la presenza di effetti repulsivi: lo studio dell'elettricità gli appariva infatti qualcosa di profondamente complesso, qualcosa da indicare come *res difficilissima*. Ecco: la complessità del campo da esplorare sembra continuamente sconfiggere gli sforzi degli esploratori.

Cabeo, come Gilbert, fu un grande scienziato. Le sue ipotesi e le sue osservazioni hanno in sé il marchio della difficoltà dell'argomento sotto esame. E ciò risulta anche se si guarda a come certe tesi di Gilbert o di Cabeo vennero prese in considerazione dai Gesuiti del Collegio Romano, grazie anche all'intervento di uno studioso polivalente e autorevole come Athanasius Kircher (1601-1680), autore, tra l'altro, di un *Magnes sive De arte magnetica* pubblicato nel 1641. Ricercatori come Gaspar Schott (1608-1666), Emanuel Maignan (1601-1676), Tomaso Cornelio (1614-1684) e Francesco Lana (1631-1687) non riescono a scavalcare i problemi lasciati aperti dal *De Magnete* per quanto riguarda la formulazione di «certe dimostrazioni» galileiane. Eppure il *Magisterium naturae et artis* di Francesco Lana, apparso in tre volumi tra il 1648 e il 1692, è un grande lavoro enciclopedico che contiene in sé una delle più vaste trattazioni seicentesche sui fenomeni elettrici. Dopo aver mostrato le ragioni per cui è necessario

parlare di effluvii elettrici, Lana definisce i corpi capaci di esibire una fenomenologia di quel tipo come oggetti che inviano emanazioni nell'aria circostante, generando in quest'ultima una sorta di espansione connessa a fatti di natura termica. I meccanismi che garantivano, secondo Lana, l'adesione di piccoli oggetti alla superficie dei corpi elettrici, dipendevano così da una fisica nella quale, a forza di congetture, si facevano intervenire le emanazioni di sostanze ignee e solforose, le variazioni di densità dell'aria e il calore. Una fisica complessa e qualitativa: una fisica non *ancora* matematizzabile — e quell'*ancora* designa un intervallo di tempo molto lungo, poiché Cavendish o Coulomb o Volta interverranno solamente sul finire del Settecento.

2. *I vortici, il vuoto e la sfera di zolfo.*

La Terra era simile al Sole. Come ogni stella, aveva una zona centrale formata dal primo elemento, l'elemento del fuoco, e questo elemento era costituito da corpuscoli minuti e veloci. I mutamenti subiti dalla Terra erano stati provocati dalle azioni meccaniche delle parti di materia celeste, del peso, della luce e del calore. Nei *Principia philosophiae* del 1644 Cartesio descriveva, in un simile quadro generale, il fluire, attraverso i pori della Terra, di particelle che si muovevano rotando su stesse. Queste particelle penetravano il corpo del pianeta, lo abbandonavano uscendo nell'aria per viaggiare sino ai luoghi vorticosi più esterni e poi tornavano verso la Terra. Cartesio in tal modo offriva spiegazioni per due fenomeni osservabili. Il magnete è orientato lungo direzioni precise e misurabili: e ciò accade poiché esso è attraversato da canali lungo i quali scorrono le particelle — queste ultime agiscono infatti sul magnete imponendogli quella direzione che consente loro di fluire liberamente lungo i canali. L'attrazione reciproca fra i due poli non implica forze occulte: le particelle emergenti dal polo di un magnete possono penetrare il corpo d'un altro magnete che offra loro il polo opposto al precedente, e così trascinano l'aria interposta tra i due magneti. Ma il trascinamento dell'aria non può far nascere un vuoto, ed allora i due magneti si avvicinano l'uno all'altro. Se i poli contrapposti sono tra loro simili, allora i due magneti si allontanano l'uno dall'altro per lasciare spazio ai flussi di particelle in moto, le quali non potrebbero infatti penetrare nei canali come nel caso precedente.

Cartesio può, a questo punto, suggerire una spiegazione ulteriore. La pietra magnetica ha i canali già orientati, mentre un frammento di ferro è privo di questa caratteristica ma può assumerla se viene collocato vicino alla sorgente della virtù magnetica, e cioè in zone interessate dalla sfera di attività del magnete: i corpuscoli che escono da quest'ultimo forzano i pori del ferro

e li orientano, dopo di che appaiono gli effetti osservabili. E poi c'è l'ambra e l'insieme dei corpi elettrici: l'attrito spreme, fuori da questi corpi, particole, che poi tornano all'origine trascinando con sé frammenti leggeri di materia.

La discussione puramente qualitativa in termini di vortici rimarrà un punto di riferimento, per molti scienziati francesi, sino alla prima metà del Settecento. Nel *Traité de physique* di Jacques Rohault (1620-1675), pubblicato nel 1671, l'elettricità e il magnetismo sono trattati con il linguaggio immaginifico delle vorticosità e François Bayle (1622-1709), nei tre volumi dell'opera intitolata *Institutiones physicae* e pubblicata nel 1700, elogia Cartesio per aver cancellato dalla mente umana le oscurità della fisica degli scolastici. I vortici spiegano molti misteri filosofici anche per Noël Régnault (1683-1762), che pubblica nel 1734 i volumi de *L'origine ancienne de la physique nouvelle*. Jean-Antoine Nollet, attorno alla metà del secolo, dovrà polemizzare, come vedremo, contro i modelli cartesiani. Pur criticando i molti errori della fisica di Cartesio, il grande Christiaan Huygens affronta sul finire del Seicento il complesso problema costituito dalla spiegazione in termini cartesiani delle scoperte effettuate da Otto von Guericke (1602-1686).

Il problema era effettivamente complesso. Guericke, affascinato dalla grandiosità del cosmo e dei moti planetari in spazi lontani, aveva cercato di ricostruire in Terra una porzione di quegli spazi, con il fine di eseguire osservazioni ed esperimenti che potessero in qualche modo chiarire il lavorio delle *virtù mondane*, delle anime e dei poteri insiti nei pianeti. Nella città di Ratisbona, durante un soggiorno dovuto a questioni di natura politica, Guericke, che già da tempo era rappresentante degli interessi della città di Magdeburgo, diede nel 1654 l'annuncio relativo alla possibilità di produrre il vuoto, entro volumi limitati, per mezzo di pompe. Il dispositivo di Guericke, descritto da Gaspar Schott nel 1657, sembrava portare argomenti seri a favore dell'opinione secondo cui lo spazio tra i pianeti e il vuoto artificialmente prodotto grazie a una pompa avevano proprietà comuni: mancanza di resistenza al moto di oggetti, permeabilità al passaggio della luce, e, infine, impermeabilità al passaggio dei suoni.

Collegato a questa analogia era d'altra parte il comportamento delle emanazioni provenienti dai corpi e dai pianeti. Tali emanazioni erano misteriose. Si trattava di fluidi materiali come l'aria, o di effluvii non materiali come alcuni pensavano che fossero quelli emessi da un magnete? Secondo Guericke esistevano ragioni per respingere le idee a suo tempo diffuse da Gilbert a proposito del magnetismo terrestre. Gilbert aveva costruito le cosiddette «terrelle» magnetiche per poter compiere esperimenti su oggetti che, a suo avviso, erano riproduzioni su scala ridotta della Terra. Guericke, invece, fabbricò delle sfere, miscelando alcuni materiali in una fusione di

zolfo che veniva realizzata entro un globo di vetro. Dopo il raffreddamento si procedeva a rompere il globo, e la sfera che si otteneva esibiva effetti elettrici dopo essere stata strofinata. Le osservazioni più importanti che Guericke compì lavorando sulle sfere sulfuree furono quelle in base alle quali si poteva concludere che l'azione elettrica era capace di propagarsi lungo un filo, qualora un capo del filo fosse stato messo in contatto con la sfera elettrificata. Si trattava di una scoperta fondamentale. Eppure, date la scarsa riproducibilità degli esperimenti con la sfera sulfurea e la crescente mancanza di interesse per osservazioni tendenti a studiare effetti che molti intellettuali ormai valutavano come residui del sapere occulto, ciò che Guericke aveva effettivamente individuato ponendo un filo a contatto del globo strofinato non entrò a far parte delle conoscenze acquisite. Come giustamente fa rilevare Heilbron, le scoperte di Guericke e le riflessioni inedite di Huygens poterono contribuire allo sviluppo della scienza dei fenomeni elettrici solo quando, nella prima metà del Settecento, altri studiosi le incontrarono nuovamente sul loro cammino (Heilbron 1979, 219, 226). La crescita del numero dei dati empirici, l'allargamento dei cataloghi delle sostanze suscettibili di trasformarsi per attrito in corpi elettrici, il dibattito sugli effluvii, sulle virtù motrici e sulle simpatie, e la discussione sulle terrelle di Gilbert o sui globi di Guericke avevano certamente fatto compiere molti passi ad una conoscenza dei fenomeni elettrici e magnetici che, nel secolo precedente, avevano suscitato la curiosità di uomini come Fracastoro o dalla Porta. Ma non era affatto chiara, nel secolo di Galilei e di Newton, la direzione che quei passi avrebbero pur dovuto in qualche modo seguire per giungere ad una comprensione dei fenomeni che fosse paragonabile a quella che si stava ottenendo nelle scienze dell'astronomia, della matematica e della teoria del moto.

Nei *Saggi di naturali esperienze* del 1667 Lorenzo Magalotti, «saggiato» segretario nell'Accademia del Cimento, premetteva a un resoconto d'esperimenti sulla calamita (e sull'ambra) una dichiarazione in cui le difficoltà del tempo si riflettevano onestamente: «Conciossiacosaché le maravigliose operazioni della calamita siano un largo pelago, dove per molto che ci abbia dello scoperto, rimane verisimilmente assai più da scoprire, noi non siamo stati finora cotanto arditi d'ingolfarci per esso, benissimo accorgendoci che il tentare in quello nuovi ritrovamenti richiede un intero e lunghissimo studio e quello non interrotto da altre speculazioni» (Magalotti 1976, 228). In quel «largo pelago», tuttavia, i *Saggi* redatti da Magalotti avevano navigato bene, poiché potevano discutere un fatto di eccezionale importanza: «Credesi volgarmente che l'ambra tiri a sé i corpi: ma questa è un'azione scambievole e niente più propria dell'ambra che de' medesimi corpi, da' quali anch'essa è tirata, o per lo meno ella ad essi s'appiglia» (*Ibid.*, 237). La scoperta di una

mutualità nell'interazione elettrica non risaliva certo alle sperimentazioni di Magalotti o di qualche accademico, ma a lavori di Honoré Fabri (1607-1688), l'autore di opere come i *Dialogi physici* del 1655.

Il problema non è tanto quello di una analisi di priorità, quanto quello che riguarda la fondamentalità d'una scoperta che anche Robert Boyle (1627-1691) fu in grado di compiere e descrivere nel 1675. La mutualità nelle interazioni elettriche, la capacità di un filo a condurre l'effetto elettrico o le prime osservazioni sulla repulsione tra corpi elettrificati rappresentarono, nel Seicento, tappe basilari. La loro fondamentalità non era tuttavia evidente, poiché si trattava di effetti immersi in una folla di dati non ancora percorsa da teorie sufficientemente potenti. Così erano oggetto di divergenze esperimenti che tendevano a chiarire il ruolo dell'aria nell'attrazione provocata dall'ambra. Gli accademici fiorentini e Robert Boyle, usando rispettivamente il vuoto di un tubo torricelliano e il vuoto ottenibile mediante le pompe costruite da Boyle e da Hooke, cercarono di realizzare un *experimentum crucis* contro le opinioni sostenute da Cabeo e rielaborate da Lana. Ma Lana poteva ragionevolmente invalidare quell'esperimento affermando che in entrambi i casi non si erano fatte osservazioni in un vuoto tale da eliminare ogni aria residua.

In realtà gli esperimenti di quel tipo erano difficilissimi da interpretare, e le difficoltà nascevano da fattori che Boyle o Lana neppure potevano immaginare. Lo slogan galileiano secondo cui un sistema fisico deve essere il più possibile isolato per rivelare le interne regolarità della natura, e il motto degli accademici del Cimento, che invitava a scoprire i fatti *provando e riprovando*, non garantivano guide sicure per chi si accingeva a tracciare rotte sul «largo pelago» di Magalotti. Quali erano infatti gli «impedimenti» da eliminare, e quali le regolarità da cercare? Erano questi gli interrogativi che ancora si riproponevano un secolo dopo l'edizione del *De Magnete* di Gilbert.

3. *La materia del fuoco e la natura della luce.*

Una delle difficoltà maggiori che si incontravano nelle ricerche sull'elettricità e il magnetismo era dunque costituita dall'incertezza a proposito di ciò che poteva essere misurato. Osservare un campo di fenomeni e sottoporre a sperimentazione alcuni sistemi naturali che con particolare evidenza esibiscono fenomenologie riproducibili sono momenti basilari nell'indagine sulla natura, ma non sempre l'osservazione e la sperimentazione sono in grado di dare informazioni effettivamente ricche, se non sono accompagnate da misure di questo o quel parametro. In astronomia la prassi della misurazione

aveva ottenuto risultati preziosi ancor prima di Keplero, e Galilei aveva saputo progettare e realizzare esperimenti di misura concernenti il moto dei corpi nel campo gravitazionale terrestre. Ma, come si è visto, le indagini sui fenomeni elettrici e magnetici furono, per molti decenni, connesse a tecniche osservative che, pur essendo caratterizzate da una certa sensibilità, non garantivano tuttavia la raccolta di dati di misura. Il versorio, le piume o gli oggetti leggeri con cui ci si avvicinava ai corpi elettrizzati erano certamente in grado di rivelare effetti deboli, ma non servivano in alcun modo a quantificare quegli effetti. Solo verso la metà del Settecento cominciarono ad essere costruiti strumenti di misura, come l'elettroscopio che Nollet descrisse nella prima parte delle sue *Lettres sur l'électricité* del 1753. Il dispositivo permetteva di proiettare su una scala graduata l'ombra di un doppio pendolo la cui disposizione angolare doveva in qualche modo essere proporzionale all'effetto elettrico da misurare, ma il termine *elettrometro*, che lo stesso Nollet aveva suggerito, non era adeguato a ciò che in realtà era un elettroscopio.

Difficoltà analoghe si erano avute, per tutto il Seicento, a proposito dei fenomeni termici. Ne *Il Saggiatore* Galilei aveva sostenuto, nell'ambito della distinzione tra le qualità, che il calore era la conseguenza di «una moltitudine di corpicelli minimi» o ignei che si muovevano con velocità elevate. Esisteva la possibilità di valutare quantitativamente un fenomeno termico? In una lettera del 1638, il Castelli descrisse «un istrumento da esaminare i gradi del caldo e del freddo», che Galilei avrebbe costruito e usato nei primi anni del secolo (Galilei, E.N., XVII, 377-378). Magalotti, nei già citati *Saggi*, descriveva alcuni strumenti «per conoscer le mutazioni del caldo e del freddo». Erano dei termometri di cristallo, nei quali il liquido termometrico era l'alcool: le scale graduate erano tra loro diverse (in un caso i 20 gradi corrispondevano al «freddo della neve e del ghiaccio» e gli 80 alla «massima attività de' raggi solari», in altri la scala comprendeva 50 o 300 divisioni (Magalotti 1667, 63-71).

Così il primitivo termoscopio ad aria di Galilei era diventato un termometro ad alcool fornito di scale graduate. Alcuni decenni più tardi un accademico del Cimento, Carlo Renaldini (1615-1698), fece la proposta di fissare la graduazione in rapporto alle temperature del ghiaccio fondente e dell'acqua in ebollizione. Va comunque detto che la grandezza sottoposta a misura da strumenti di quel tipo non era ancora definibile se non per mezzo di espressioni che facevano riferimento alle «mutazioni del caldo e del freddo» o ai «gradi del caldo e del freddo»: espressioni che non erano sorrette da conoscenze atte a separare la nozione di temperatura da quella di quantità di calore, e che non potevano d'altra parte stabilire connessioni precise tra le dilatazioni del liquido termometrico e i vari processi fisici e

chimici che il cosiddetto calore generava nei fluidi, nei solidi, nell'aria o nei vapori.

La presenza di uno strumento di misura e la sua diffusione in Inghilterra o in Francia, durante il Seicento, non garantivano dunque la possibilità di avere dati empirici di agevole interpretazione. Esisteva ancora una differenza profonda tra il misurare i parametri astronomici del moto d'un pianeta o gli spazi percorsi da un grave che rotolava su di un piano inclinato in intervalli di tempo dati, e il misurare qualcosa come il *caldo*. Sul finire del secolo Newton cercava di capire il calore attraverso studi chimici, e l'autorevole rivista «Philosophical Transactions» nel 1701 pubblicava un suo scritto anonimo intitolato *Scala graduum Caloris*, nel quale, oltre ad argomenti relativi a quella che sarebbe stata chiamata *legge di raffreddamento* di Newton, apparivano riferimenti alle conoscenze chimiche seicentesche. E nel *De Natura Acidorum* del 1692 Newton definiva il calore in un contesto squisitamente chimico, attraverso l'asserzione secondo cui «calor est agitatio partium» (Newton 1692, 256).

La scienza dell'era barocca aveva d'altra parte acquisito un gruppo di conoscenze controllabili a proposito del vuoto e dei fluidi elastici. Evangelista Torricelli (1608-1647) aveva avviato a soluzione il problema che Galilei e Giovanni Battista Baliani (1582-1666) avevano dibattuto sin dal 1614, che era nato attorno alla possibilità di misurare il peso specifico dell'aria e che s'era collegato agli ostacoli esistenti in ogni tentativo di sollevare l'acqua oltre a una certa altezza. Il problema, secondo Galilei, poteva essere risolto invocando una sorta di resistenza che il vuoto, presente in «vacuoli» interposti fra le particelle del fluido, opponeva alla salita di quest'ultimo, mentre Baliani invocava il peso dell'aria sovrastante la colonna d'acqua. Torricelli intervenne sulla via già tracciata da Baliani, e cioè ragionando, come egli stesso scrisse in una lettera del 1644, sulla base dell'analogia tra atmosfera e mare già a suo tempo descritta da Baliani: «Noi viviamo sommersi nel fondo d'un pelago d'aria elementare, la quale per esperienze indubitate si sa che pesa» (Torricelli 1975, 658). Il calcolo allora mostrava che si doveva lavorare sull'equilibrio tra una colonna d'acqua d'altezza data e una colonna d'aria sovrastante. Era possibile, però, misurare le variazioni di peso dell'aria? La possibilità dipendeva dalla sostituzione della colonna d'acqua con una colonna di un fluido di densità molto maggiore: il mercurio. Nasceva così il tubo barometrico, nella cui parte superiore si formava il cosiddetto vuoto torricelliano. La spiegazione fornita da Torricelli e la costruzione di barometri gettavano ombre sulla regola plurisecolare secondo la quale la Natura non poteva ammettere l'esistenza del vuoto, e, di conseguenza, il punto di vista espresso dal grande fisico e matematico italiano incontrò molte difficoltà. Fu Mersenne a informare Blaise Pascal (1623-

1662) dei dati relativi al fenomeno torricelliano, e fu Pascal a ripetere l'esperimento con successo, a stimolare Florin Périer a controllare nel 1648 l'osservabilità di differenze di livello della colonna barometrica in misure eseguite rispettivamente alla base e sulla vetta del Puy de Dôme, e a diffondere efficacemente la teoria torricelliana nell'opera postuma intitolata *La pesanteur de la masse d'air*.

Solo in apparenza le tematiche torricelliane sono slegate dal problema della misura termometrica. Quest'ultima investe un sistema complesso di relazioni tra grandezze fisiche tra loro diverse, e proprio quel sistema cominciò ad essere esplorato da Boyle nell'ambito degli studi relativi alla produzione del vuoto. Servendosi di pompe fabbricate da Robert Hooke, Boyle eseguì una serie di osservazioni che vennero riportate nell'opera intitolata *New Experiments Physico-Mechanicall, touching the Spring of the Air, and its effects*, pubblicata nel 1660. Negli stessi anni altri ricercatori riflettevano sulle possibili correlazioni tra la pressione dell'aria e il volume da essa occupato: Richard Townley, Henry Power, lo stesso Hooke e, più tardi, Edme Mariotte (1620-1684), che pubblicò nel 1679 un lavoro intitolato *Essay de la nature de l'air*. Il risultato di queste analisi può essere riassunto nella constatazione che il prodotto della pressione e del volume dell'aria è, con buona approssimazione, una costante. Questo risultato era tuttavia non evidente a Boyle, il quale aveva invece perseguito il fine di trovare una base empirica sicura per la tesi secondo cui l'elasticità dell'aria è tale da giustificare gli equilibri torricelliani tra una colonna d'aria e una colonna d'acqua o di mercurio. Come lo stesso Boyle dichiarò, l'accordo tra i dati empirici raccolti e descritti nell'opera del 1660 e l'ipotesi di una relazione molto semplice tra pressione e volume gli apparve con chiarezza solo dopo aver ricevuto alcune pagine di Richard Townley nelle quali quell'ipotesi veniva formulata in termini espliciti, sulla base di altre esperienze effettuate nel 1653 da Townley e da Henry Power. La questione che forse preoccupava maggiormente Boyle era quella che riguardava le critiche mosse all'intera tematica del vuoto e basate sulla congettura secondo cui il mercurio torricelliano era sospeso grazie ad un *funiculus*. Contro le tesi dei cosiddetti *pienisti*, Francis Hall — noto come Linus — e Thomas Hobbes, Boyle pubblicò infatti nel 1662 le pagine di *A Defence of the Doctrine touching the Spring and Weight of the Air*. Benché Boyle, nell'opera del 1660, avesse esposto le proprie idee sull'elasticità dell'aria e quelle a suo tempo suggerite da Cartesio, senza prendere nettamente posizione contro queste ultime, la massa di dati sperimentali che egli metteva in discussione deponeva fortemente a favore di opinioni sul vuoto che ben difficilmente avrebbero potuto essere riconciliate con la fisica dei cartesiani.

Come si vede, l'intera questione era intricata a causa di fattori molteplici,

ed è ancor oggi non semplice stabilire a chi debba toccare il merito d'aver scoperto una legge fondamentale sulla pressione e il volume dell'aria. Resta il fatto che, nel 1676, Mariotte, il quale probabilmente conosceva i lavori di Boyle ma non li citava, poteva riassumere lo stato del problema sostenendo la necessità di stabilire, per mezzo di misure effettuate con un esperto costruttore di barometri e di termometri, se l'aria condensava proprio in proporzione ai pesi da cui era compressa, oppure se questa condensazione seguiva altre leggi e altre proporzioni. Lo stesso Newton, che inseriva le proprie riflessioni sul calore fra le argomentazioni chimiche, prendeva in considerazione lo studio delle correlazioni tra volume e pressione in ambito fisico matematico, e cioè nel secondo libro dei *Principia*. Nella sezione *V*, infatti, Newton sviluppava un teorema e uno scolio dedicati proprio ai fluidi elastici, costituiti da particelle, nei quali la densità è proporzionale alla compressione mentre le forze centrifughe delle particelle «sono inversamente proporzionali alle distanze dei loro centri», e rifletteva su ciò che avrebbe dovuto accadere qualora le forze centrifughe fossero state inversamente proporzionali a potenze superiori di quelle distanze (vol. I, cap. XV).

Restava comunque non chiaro il rapporto tra lo studio chimico del calore come agitazione di particelle e lo studio fisico matematico e sperimentale della forma di regolarità osservabile tra la pressione e il volume di un fluido formato da particelle. Durante la prima metà del Settecento vi furono tuttavia esempi di trattazione quasi-cinetica dei fluidi elastici, tra i quali il più noto fu certamente quello che Daniel Bernoulli (1700-1782) espose nella sua *Hydrodynamica* del 1738. D. Bernoulli scriveva che la pressione dell'aria non aumentava soltanto a causa della diminuzione del volume occupato, ma anche in funzione di un aumento di temperatura, e mostrava che, a temperatura costante, era valida la legge di Boyle, e che era necessario introdurre nei calcoli il quadrato della velocità delle particelle. Ma il problema generale del rapporto tra le misure fornite da un termometro, le conoscenze sulle azioni chimiche del calore, i modelli teorici dei fluidi elastici e l'accettazione della legge PV = *costante* rimaneva inesplorato. Nel *Cours de chimie* del 1675, Nicolas Lémery (1645-1715) parlava del fuoco in termini di corpuscoli ignei che ponevano in agitazione le parti di un corpo, generando così il calore, mentre Nicolaas Hartsoeker (1656-1725) difendeva, nelle *Conjectures physiques* del 1706, l'imponderabilità del fuoco: il cammino che si doveva percorrere era ancora lungo e intricato, e la seconda metà del Settecento avrebbe riservato notevoli sorprese.

La fenomenologia del calore era d'altra parte intrecciata a quella della luce, e, insieme, esse venivano spesso prese in considerazione come connesse alle conoscenze sperimentali sull'elettricità e il magnetismo. Negli anni di Galilei e di Keplero lo studio dei fenomeni luminosi era ancora basato su

tradizioni culturali che tendevano ad analizzare fenomeni fisiologici legati al meccanismo della visione, ad elaborare modelli geometrici di propagazione, a dibattere il problema delle *specie* e dei *simulacri*, ad affrontare — secondo criteri di semplicità apparentemente evidenti — il difficilissimo tema del comportamento ottico di una sfera, a trascurare l'analisi delle lenti che tecnici e artigiani già da tempo fabbricavano per correggere alcuni difetti della vista. Keplero, con l'opera *Ad Vitellionem paralipomena* del 1604 e con la *Dioptrice* del 1611, seppe sotto molti aspetti superare quella tradizione, delineando i vincoli grazie ai quali le ricerche sull'ottica dovevano essere distinte dalle riflessioni sulla fisiologia della visione. Ma i lavori kepleriani non esercitarono molta influenza, anche se essi contenevano gli elementi di una ottica geometrica capace di studiare le lenti, di spiegare il funzionamento del cristallino nell'occhio, di pensare in termini corretti lo stesso cannocchiale di Galilei e di porre le basi per la costruzione del cannocchiale ad oculare convesso, probabilmente realizzato attorno al 1630 da Christoph Scheiner (1575-1650).

Nel 1637 Cartesio pubblicava, insieme a *Les Météores*, il *Discours de la Méthode* e *La Géométrie*, l'opera intitolata *Dioptrique*. In quelle pagine la questione dei fenomeni luminosi veniva affrontata, secondo i criteri ispiratori della scienza di Cartesio, lungo una direttrice argomentativa che aveva come punto di riferimento la natura della luce, intesa come una sorta di pressione propagantesi istantaneamente entro un plenum.

Agganciandosi a questa ipotesi e mettendo in movimento forme di pensiero modellate su analogie meccanicistiche, la *Dioptrique* esponeva alcune leggi dell'ottica, quali quelle della riflessione e, soprattutto, quella della rifrazione. Per quest'ultima Cartesio invocava congetture particolarissime sulla possibilità che la luce si muovesse più rapidamente in un fluido come l'acqua che nell'aria. Va d'altra parte tenuto presente che non poche polemiche sorsero attorno a questioni di priorità sulla legge di rifrazione. Thomas Hariot (ca. 1560-1621) e Willebrod Snell (1591-1626) l'avevano già scoperta e illustrata con ragionamenti geometrici, e lo stesso Snell ne discuteva nelle sue lezioni all'Università di Leida, mentre Keplero non ne aveva trattato. Cartesio, che aveva ricavato alcune norme sulla scomposizione della luce dal matematico e astronomo arabo Alhazen (Ibn-al-Haytam, 965-1039), e che ne aveva fatto uso per dimostrare la legge in questione, fu accusato di plagio, nonché di incoerenza avendo di fatto suggerito egli stesso una violazione del principio generale secondo il quale la velocità della luce era infinita. Fra i critici dell'ottica cartesiana figurava in primo luogo Pierre Fermat (1601-1665), il grande matematico che dimostrò la legge di rifrazione basandosi su un principio di minimo e su un'ipotesi relativa alla velocità della luce. Il principio di minimo era una specie di regola relativa

all'economia della natura in generale e, nel caso dei fenomeni ottici, affermava che la luce impiegava il tempo minimo nell'attraversare mezzi ottici tra loro diversi. L'ipotesi invece parlava di costanza della velocità della luce in un dato mezzo e di una diminuzione di tale velocità in funzione della crescita della densità dei mezzi ottici. Fermat, che già aveva discusso il problema nel 1637 grazie all'intervento di Mersenne, espose la dimostrazione nel 1662 e, successivamente, nello scritto intitolato *Synthesis ad refractiones*.

I cartesiani lo accusarono di aver utilizzato come principio fisico una norma sostanzialmente non fisica (quella che enunciava un principio di minimo) e lo stesso Huygens respinse con durezza la validità del principio, anche se, in seguito, accettò buona parte della trattazione di Fermat sulla rifrazione. Ma un nuovo fenomeno venne a stimolare le ricerche sulla luce durante la seconda metà del secolo: la scoperta, fatta da Francesco Maria Grimaldi (1618-1663) e pubblicata nel testo intitolato *Physico-mathesis de lumine, coloribus et iride*, edito nel 1665, che la luce è in grado di propagarsi non solo in linea retta, o nei modi della riflessione e della rifrazione, ma anche in modo tale da superare ostacoli posti sul suo cammino. La luce, secondo Grimaldi, si muove anche per diffrazione, scomponendosi in parti che si muovono secondo direzioni diverse. Se un corpo opaco viene investito da un raggio di luce solare, l'ombra che quel corpo proietta su uno schermo non corrisponde a quella prevedibile secondo la regola del cammino rettilineo della luce, ma è più ampia e presenta, inoltre, una sorprendente presenza di bande variamente colorate. Nel 1669, poi, Erasmus Bartholinus (1625-1698) dava alle stampe un lavoro intitolato *Experimenta crystalli islandici disdiaclastici, quibus mira et insolita refractio detegitur*, nel quale la situazione diventava ancor più complessa. Se un raggio di luce incontra un cristallo di spato d'Islanda, allora il raggio si sdoppia: una parte obbedisce alla legge della rifrazione, l'altra non vi obbedisce; d'altra parte nel cristallo esiste una direzione privilegiata lungo la quale il raggio non subisce la doppia rifrazione.

I corpi, insomma, avevano un comportamento rispetto alla luce che non rientrava nei canoni di un'ottica geometrica basata sulla riflessione e sulla rifrazione. Come inoltre notava Hooke nel suo trattato *Micrographia*, pubblicato nel 1665, straordinari fenomeni di colorazione apparivano ad esempio quando la luce incideva su lamine molto sottili come quelle che si potevano realizzare per mezzo di bolle di sapone o di straterelli d'olio.

Si stava insomma scoprendo una fenomenologia molto complessa. Nello stesso tempo restava aperta la questione della velocità della luce e della possibilità di escogitare dei dispositivi atti a misurare quella velocità. L'astronomo Gian Domenico Cassini (1625-1712) aveva individuato un fatto astronomico relativo ai movimenti dei satelliti di Giove. I tempi che

erano necessari affinché un satellite riuscisse ad attraversare il cono d'ombra del pianeta erano dipendenti dalla distanza tra quest'ultimo e la Terra: questo fatto divenne un argomento per determinare la velocità della luce. Un astronomo danese, Olaf Römer (1644-1710), interpretò infatti l'osservazione ipotizzando una velocità finita della luce e calcolò, per tale velocità, un valore di circa 214.000 chilometri al secondo. Se questa era la velocità della luce, allora la luce stessa doveva impiegare circa 22 minuti per attraversare una distanza pari al diametro dell'orbita percorsa dalla Terra attorno al Sole. Diventava in tal modo possibile effettuare previsioni sui tempi di occultamento di un satellite di Giove: previsioni che, con buona approssimazione, trovarono conferma, anche se errate valutazioni sul diametro dell'orbita terrestre avevano portato Römer a determinare una velocità delle luce non conforme a quella che, in seguito, si sarebbe riusciti a misurare con maggior precisione. La spiegazione esposta da Römer sul finire del 1676 fu comunicata all'accademia delle scienze parigina, dove i cartesiani — e lo stesso Cassini che pure aveva sollevato il problema — la sottoposero a critiche severe, in quanto si trattava di una spiegazione che, esplicitamente, tendeva a chiudere, in chiave anticartesiana, la dibattutissima questione della velocità infinita o finita della luce. Nella prima metà del Settecento, grazie soprattutto agli studi dell'astronomo James Bradley (1693-1762) sull'*aberrazione* (vol. I, cap. XVII), la tesi difesa da Römer fu infine accettata.

Il nuovo panorama empirico sollevava, a livello teorico, quesiti di varia natura. Non era più accettabile senza riserve l'opinione che la luce si propagasse solo su cammini rettilinei, come s'era potuto pensare prima della scoperta della diffrazione, della doppia rifrazione e dei colori nelle lamine sottili. Ciò comportava anche l'indebolimento delle analogie tra moto della luce e moto di corpuscoli, che pure erano state utili per affrontare i fenomeni di riflessione. Già Grimaldi aveva fatto intervenire immagini ondulatorie, e così pure Hooke, il quale aveva suggerito che la propagazione della luce generasse onde sferiche nei mezzi attraversati, facendo uso di argomenti in parte analoghi a quelli elaborati poco dopo dal gesuita Gaston Pardies (1636-1673). Vediamo ora come la congettura ondulatoria fu strutturata da Huygens nel suo tentativo di rielaborare l'ottica cartesiana.

Nel *Traité de la Lumière*, pubblicato nel 1690 ma già redatto attorno al 1678 — quando cioè erano state da tempo rese note le pagine newtoniane sulla scomposizione della luce —, Huygens prendeva le distanze dalle ipotesi corpuscolari e difendeva l'ipotesi secondo cui i fenomeni ottici dipendono dal passaggio di onde luminose attraverso corpi trasparenti. L'analogia ondulatoria si reggeva, in parte, su un riferimento alla propagazione del suono nell'aria. Ma poiché le esperienze sul vuoto avevano mostrato che la

luce (a differenza del suono) era in grado di attraversare anche il vuoto, allora Huygens suggeriva che esistesse un mezzo etereo — duro ed elastico, onnipresente e inosservabile direttamente — atto a trasmettere le onde luminose. Una trattazione geometrica della composizione delle onde consentiva di risolvere un certo numero di problemi aperti: la legge di Fermat e la doppia rifrazione potevano essere dedotte per via teorica, e, nello stesso tempo, la spiegazione poteva essere estesa ai fenomeni della riflessione e della rifrazione.

Il breve trattato di Huygens lasciava insoluti i problemi che erano più strettamente connessi all'analogia tra luce e suono. L'analogia era potente anche nei suoi aspetti negativi, poiché implicava che le vibrazioni eteree fossero longitudinali e non trasversali. Già Huygens aveva osservato fatti incompatibili con la teoria, studiando il passaggio della luce attraverso due cristalli di calcite disposti in modo tale da presentare un parallelismo tra le sezioni principali: l'uscita della luce dipendeva fortemente dall'angolo di rotazione del secondo cristallo rispetto al primo, al livello di osservazione incentrato sulla doppia rifrazione. Huygens parlava di questo fatto indicandolo come meraviglioso e tale da sfuggire ad una spiegazione. Altri scienziati, secondo Huygens, avrebbero forse trovato ipotesi sufficienti a determinare le cause dell'inatteso fenomeno, lasciando inalterate quelle che egli stesso già aveva formulate. La previsione era vera solo a metà. La scoperta, molti decenni più tardi, della polarizzazione, sarebbe stata spiegata con una teoria ondulatoria, ma si sarebbe trattato di una teoria che definitivamente eliminava dal campo dell'ottica fisica la congettura di Huygens sulla longitudinalità delle onde luminose. Altre cose dovevano comunque farsi ancora strada nella rete del sapere. La seconda metà del Seicento aveva fatto sorgere una grande massa di problemi, che si estendeva dalla meccanica terrestre galileiana al movimento dei corpi celesti kepleriani, dalle strane virtù della calamita ai fenomeni del calore, dalle emanazioni dei corpi elettrificati alla diffrazione, dalle proprietà dei numeri alle certezze delle dimostrazioni geometriche relative alle curve. E, nel 1642, era nato Isaac Newton.

BIBLIOGRAFIA

Testi

R. BOYLE, *Opere*, a cura di C. Pighetti, Torino, UTET, 1977.
G. GALILEI, *Le Opere*, Edizione Nazionale, Firenze, Barbèra, 1968.
C. HUYGENS, *Traité de la lumière*, Leida, Pierre Vander, 1690. Riproduzione anastatica, Bruxelles, Culture et Civilisation, 1967.
L. MAGALOTTI, *Saggi di naturali esperienze* (1667), a cura di T. Poggi Salani, Milano, Longanesi, 1976.
I. NEWTON, *De natura acidorum* (1692), in, *Isaac Newton's papers & Letters on natural philosophy*, a cura di I. Bernard Cohen, Cambridge, Harvard University Press, 1978.
J. PRIESTLEY, *The history and present state of electricity, with original experiments*, London, Bathurst & Lowndes, 1767. Riproduzione anastatica a cura di R.E. Schofield, New York, Johnson Reprint Corporation, 1966.
E. TORRICELLI, *Opere scelte*, a cura di L. Belloni, Torino, UTET, 1975.

Studi

J. HEILBRON, *Electricity in the 17th and 18th centuries. A study of early modern physics*, Berkeley, University of California Press, 1979.
A. KOYRÉ, *La révolution astronomique*, Paris, Hermann, 1961 (trad. it.: *La rivoluzione astronomica*, Milano, Feltrinelli, 1966).
D.C. LINDBERG, *Theories of vision from Al-Kindi to Kepler*, Chicago, The University of Chicago Press, 1976.
J.F. SCOTT, *The scientific work of René Descartes*, London, Taylor & Francis, 1976.

XV. *Isaac Newton* (di ENRICO BELLONE)

1. *Da Woolsthorpe a Londra.*

Woolsthorpe: pochi abitanti, a sud di Grantham nel Lincolnshire. Il 25 dicembre del 1642, a Woolsthorpe nasceva Isaac Newton. L'8 gennaio dello stesso anno era morto Galileo Galilei.

La vita di Newton (1642-1727) si articolò grosso modo in quattro fasi. Sino al 1661 il futuro autore dei *Principia* condusse un'esistenza abbastanza instabile. Orfano di padre all'età di un anno, fu affidato alle cure di una nonna e, compiuti i dodici anni, frequentò una scuola pubblica a Grantham. Pochi anni dopo dovette interrompere gli studi e tornare a Woolsthorpe, poiché la madre era rimasta nuovamente vedova. Nel 1660 si recò ancora a Grantham e si preparò per l'ammissione all'università di Cambridge, dove entrò al *Trinity College*. Il periodo di Cambridge durò grosso modo sino al 1696. Nel 1665 Newton ottenne il grado di *Bachelor of Arts*, nel 1666 divenne *Junior Fellow* e, nel 1668, *Master of Art* e *Senior Fellow*. L'anno successivo cominciò ad insegnare in una cattedra di matematica.

Durante i mesi terribili della peste, tra il 1665 e il 1666, lasciò Cambridge per rifugiarsi a Woolsthorpe, dove lavorò intensamente attorno ai problemi del calcolo delle flussioni e alla fisica dell'ottica e della meccanica. Nel 1668 costruì un prototipo di telescopio a riflessione e, nel febbraio del 1672, presentò alla *Royal Society* la memoria che la rivista «Philosophical Transactions» pubblicò con il titolo di *A Letter of Mr. Isaac Newton containing his New Theory about Light and Colors*. Nel 1676 inviò a Leibniz

due lettere sul calcolo delle flussioni — note come *Epistola prior* ed *Epistola posterior* — che ebbero un ruolo particolare nella triste controversia con Leibniz a proposito della priorità della scoperta del calcolo.

Gli anni di Cambridge compresi tra il 1677 e il 1686 videro Newton compiere ricerche su un vastissimo campo di fenomeni fisici e chimici, nonché su temi di matematica e di geometria. Nel 1687 apparve la prima edizione, in un numero molto limitato di copie, dei *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*. Nel 1692 scrisse la prima lettera a Richard Bentley (1662-1742) e, l'anno successivo, cominciò a soffrire di disturbi del sistema nervoso.

Nel 1695 fu nominato Ispettore della Zecca e, nel 1703, Presidente della *Royal Society*. Iniziava così il quarto e ultimo periodo della vita di Newton. Un anno dopo dava alle stampe la prima edizione del trattato *Optiks: or, a Treatise of the Reflexions, Refractions, Inflexions and Colours of Light*. La successiva edizione, in latino, apparve nel 1706. Nel 1713 e nel 1721 si ebbero altre due edizioni del trattato sull'ottica, e, nel 1713, fu pubblicata una seconda edizione dei *Principia*. Le differenze principali tra queste edizioni dei due capolavori newtoniani saranno discusse nei paragrafi successivi. Un anno prima della seconda edizione dei *Principia* si ebbe la stesura del *Commercium Epistolicum* sulla controversia con Leibniz. Newton morì il 20 marzo del 1727.

Il trattato sull'ottica comprendeva anche due appendici dedicate allo studio delle curve algebriche e al calcolo. Nel 1711 fu pubblicata la *Analysis per aequationes numero terminorum infinitas* (scritta nel 1669) e, nel 1736, apparve postumo il *Methodus fluxionum et serierum infinitarum*. Nel 1756, a Londra, si stampavano le *Four Letters from Sir Isaac Newton to Doctor Bentley containing Some Arguments in Proof of a Deity*. Nel nostro secolo è in corso lo studio e la pubblicazione in edizioni critiche di una immensa quantità di scritti inediti.

2. *Il giovane Newton e gli anni della peste.*

Tra il 1665 e il 1666 Newton attraversò un periodo di notevolissima produttività scientifica. Di quegli anni giovanili e dei risultati in essi ottenuti si hanno testimonianze e resoconti vari, nonché una nota autobiografica che Newton stese alcuni decenni più tardi. Sulla base di quella nota si può dire che l'arco di tempo compreso tra il 1665 e il 1666 — tragicamente contrassegnato, come si è detto, da una epidemia di peste che costrinse Newton a lasciare Cambridge per ritirarsi a Woolsthorpe — fu caratterizzato da tre linee di ricerca. Durante il 1665 vi fu, da parte di Newton, un prevalente interesse per lo studio della matematica. Nei primi mesi dell'anno

successivo egli elaborò un primo schema del calcolo delle flussioni e pose le basi per una spiegazione della «teoria dei colori». Nello stesso tempo Newton iniziò a riflettere sulla possibilità di unificare la fisica di Galilei e le leggi di Keplero sui moti planetari attraverso una legge di gravitazione. Infine tentò di determinare un confronto tra la forza necessaria «per trattenere la Luna nella sua orbita con la forza di gravità alla superficie della Terra». Il risultato del confronto non fu molto soddisfacente, a causa di carenze nei dati relativi alla distanza fra la Terra e la Luna.

Newton commentò il tutto scrivendo quanto segue: «ciò accadeva durante i due anni della peste del 1665 e 1666; infatti in quei giorni ero nel fiore degli anni quanto alle invenzioni, e mi occupavo di matematica e di filosofia più che in qualsiasi altro periodo successivo» (Pala 1969, 16).

Per quanto riguarda le scoperte di Newton negli anni della peste sono stati più volte offerti dei resoconti di tipo aneddotico e in chiave apologetica. Newton non pubblicò i risultati ottenuti, affidandoli a note manoscritte che solo di recente sono state accuratamente studiate e commentate. Questi studi recenti sui manoscritti newtoniani consentono di affrontare la ricostruzione di quel singolare periodo su basi più realistiche.

In primo luogo si pone il problema delle fonti alle quali il giovane Newton si rivolse per dare un avvio concreto ai propri studi. Tra il 1661 e il 1663 egli aveva seguito piani di studio tradizionali presso il Trinity College di Cambridge e aveva letto testi e commenti usuali su Aristotele, all'interno di indirizzi di insegnamento con caratterizzazioni scolastiche. Nel 1663, tuttavia, lavorò sui *Principia Philosophiae* di Cartesio e su opere di Boyle e di Hobbes. Nell'anno successivo sappiamo che studiò Galilei e questioni di astronomia, giungendo rapidamente a un livello di interessi scientifici che richiedeva forti conoscenze matematiche. Già nell'estate del 1664 Newton annotava temi matematici, commentandoli secondo direttrici da autodidatta. Sembra che i contributi di Barrow, insegnante di matematica, agli studi intrapresi da Newton siano inferiori a quanto si è ritenuto per molto tempo, anche se è accertato che Newton si esercitò con cura sul testo di Euclide edito da Barrow. Il giovane Newton studiò alcuni testi, annotandoli e scrivendo commenti: in particolare, opere di Schooten, Viète, Wallis, Oughtred, de Witt e Cartesio. Un'opera, tuttavia, esercitò su di lui un influsso determinante: la *Géométrie* cartesiana. Da essa trasse stimoli alla riflessione e il simbolismo algebrico, così come da Oughtred ricavò il simbolismo aritmetico.

In secondo luogo occorre ridimensionare l'opinione secondo la quale i successi newtoniani in settori matematici furono principalmente dovuti a una sorta di prodigiosa capacità o predisposizione del futuro autore dei *Principia* a lunghe operazioni di calcolo numerico. Newton fece spesso operazioni del

genere ma queste ultime contengono, di frequente, errori. Il merito maggiore, nelle scoperte matematiche di Newton, deve invece essere attribuito a singolari capacità di penetrare nel significato complessivo di alcune strutture formali molto profonde e di elaborarne varianti generali. È molto interessante, in proposito, il giudizio di un esperto studioso dell'opera di Newton come Whiteside. Egli scrive che negli anni della peste «era nato un matematico» capace di compiere «errori profondi» ma dotato di un genio matematico così penetrante da trasformare il giovane studente del Trinity College in uno scienziato pari a studiosi come Huygens e James Gregory (1638-1675) e probabilmente superiore a tutti gli altri suoi contemporanei (Whiteside, I, 147).

Nell'autunno del 1666 Newton raccolse i risultati raggiunti in un manoscritto che conteneva alcune premesse e alcune regole per il calcolo delle flussioni. Senza entrare qui nel merito delle ricerche newtoniane su quello che sarebbe diventato il calcolo infinitesimale, va comunque rilevato che il linguaggio dei manoscritti di quel periodo è un intreccio di termini matematici e di termini ricavati dalla meccanica. Una curva è trattata come qualcosa che viene descritto «per moto continuo di punti» e che subisce pertanto delle variazioni che dipendono da una «velocità di accrescimento». Indicando con il nome di «fluente» una quantità descritta in tal modo, «le flussioni — sostiene Newton — si possono considerare con approssimazione arbitrariamente grande come gli incrementi delle fluenti, generati durante intervalli di tempo eguali, piccoli a piacere» (Whiteside, I, 400-414). Pur mancando della generalità e del rigore che avrebbe raggiunto in seguito, il nuovo calcolo, nella sua prima fase di sviluppo, rivelava comunque serie possibilità di applicazione per enunciare e risolvere problemi fondamentali di teoria del moto, anche se Newton, nella stesura dei *Principia*, non fece uso del calcolo flussionale ma utilizzò schemi tradizionali di argomentazione geometrica.

Per quanto riguarda l'ottica — la «teoria dei colori» a cui faceva riferimento la nota autobiografica già citata — i manoscritti newtoniani mostrano che le fonti furono principalmente, nel 1664, la versione latina dell'opera cartesiana intitolata *La Dioptrique* (oltre alla *Géométrie*) e, nel 1665, la *Micrographia* di Hooke. I manoscritti contengono commenti sulla riflessione e la rifrazione, note sulle lenti composte e sui fenomeni di aberrazione della luce, nonché sulla rifrazione su superfici sferiche. Risulta inoltre che Newton, soprattutto in riferimento ai lavori di Hooke, lavorò su aspetti di tipo sperimentale e tecnico, come la molatura delle lenti e la costruzione di telescopi.

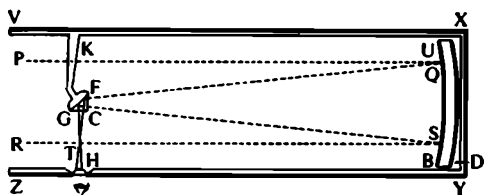
Nel primo scritto dedicato alla luce e ai colori, apparso nel 1672 sulla rivista «Philosophical Transactions», Newton fece un resoconto delle

esperienze iniziate nel 1666 e centrate sulla scomposizione della luce attraverso un prisma. Il problema è indicato dallo stesso Newton come «il celebre fenomeno dei colori»: si trattava in effetti di un problema noto da secoli, che era stato poi ripreso in esame da scienziati come Cartesio, Boyle, Grimaldi e Hooke. Newton, tuttavia, predispose l'esperimento in modo tale da ottenere risultati che contrastavano con le previsioni delle teorie esistenti. Va altresì sottolineato, come ha rilevato Thomas Kuhn (1978, 40), che il resoconto dell'esperienza che appare nello scritto del 1672 è accoppiato ad una forte idealizzazione dei risultati: una idealizzazione che consentiva di collegare la complessità del fenomeno (grazie al quale la luce bianca si decompone in uno spettro attraversando un prisma) al modello geometrico elaborato da Newton per l'interpretazione dei dati osservabili. Nello stesso tempo, però, quell'idealizzazione era anche fonte di critiche, in quanto altri studiosi potevano giustamente replicare che non era possibile osservare veramente tutto ciò che Newton aveva dichiarato d'aver visto, e che, di conseguenza, non era accettabile la tesi newtoniana secondo la quale i fatti osservabili erano in contrasto con le teorie sui fenomeni ottici. Diventava in tal modo possibile, per studiosi come Hooke, rispondere che Newton aveva compiuto troppo pochi esperimenti e che l'interpretazione newtoniana non era una necessaria conseguenza dei fatti accertati sulla scomposizione della luce bianca dovuta a un prisma. Sul finire del 1675 Newton precisò la posizione che a suo avviso doveva essere sostenuta a proposito della luce, scrivendo a Oldenburg che il problema centrale era costituito dalle reciproche azioni tra luce ed etere. Alcuni studiosi, notava Newton, erano propensi a pensare che la luce fosse costituita da corpuscoli «inconcepibilmente piccoli e veloci», emanati dai corpi. Altri, invece, ritenevano che la luce fosse una emanazione, o il movimento d'un mezzo, o altre cose ancora. «Per conto mio — osservava a questo punto, dopo aver espresso il desiderio di evitare polemiche — riterrei, qualunque cosa sia la luce, che essa è formata di raggi successivi, i quali differiscono l'uno dall'altro per circostanze accidentali, come la grandezza, la forma o l'energia». La luce, inoltre, doveva differire dalle vibrazioni dell'etere. Era opportuno pensare, allora, che «la luce e l'etere agiscano mutuamente l'una sull'altro, l'etere rifrangendo la luce e la luce riscaldando l'etere». Un raggio luminoso si propagava quindi in un etere a densità variabile: le zone a densità maggiore lo acceleravano, spingendolo verso le zone a densità minore e incurvandone il percorso (Newton 1978, 260-261).

Va tuttavia tenuto presente che Newton manteneva, nei confronti delle ipotesi sulla natura della luce, un atteggiamento complesso. A volte egli discuteva i problemi ottici nel quadro d'una visione corpuscolare. Altre volte, come nel caso dello scritto del 1672, non entrava nelle particolarità del

modello corpuscolare, e si limitava a suggerire che certi esperimenti non potevano essere in accordo con l'idea che la luce fosse una qualità ed erano invece conformi all'idea che la luce fosse una sostanza. Il dibattito tra Newton, Hooke, Pardies, Huygens, Linus, Gascoines, Lucas e l'accesa controversia tra Newton e Hooke negli anni compresi tra il 1672 e il 1676 sono rivelatori di due aspetti della nuova ottica newtoniana. Da una parte, esisteva un intricato rapporto tra elaborazione di ipotesi corpuscolari e stesura delle pagine atte ad essere pubblicate, nel senso che queste ultime non rendevano pienamente conto del ruolo che le ipotesi svolgevano nelle riflessioni di Newton. Dall'altra parte, cominciava a manifestarsi in Newton una componente psicologica complessa che lo sollecitava a nascondere, per motivi di varia natura, gli schemi effettivamente seguiti nelle ricerche, e ad evitare, nei limiti del possibile, di mettere in piena luce la natura delle ipotesi adottate. L'idea, indubbiamente presente in Newton, che il sapere debba essere dominio di pochi eletti, si associava così a una crescente propensione a ridurre al minimo ogni possibilità di libera controversia: meglio rinunciare pubblicamente ad ipotesi audaci che essere costretti a discuterle. Il che, come avremo modo di vedere, segnò profondamente l'opera newtoniana e fu alla radice di non poche ambiguità.

Il dibattito sulla luce assunse comunque in Newton un aspetto di particolare rilievo per quanto riguardava il problema della strumentazione ottica. La dispersione sembrava a Newton proporzionale alla rifrangenza: non avendo compreso che il potere dispersivo dipendeva dalla qualità dei vetri, Newton ne concluse che era impossibile ridurre o controllare l'aberrazione cromatica delle lenti ed eliminare le colorazioni che disturbavano l'osservazione telescopica. Egli fu pertanto stimolato a studiare la possibilità di costruire telescopi basati su riflettori a specchio. La problematica da cui prese le mosse era trattata nelle *Lectiones opticae*, là dove Newton osservava che troppe energie erano ormai state sprecate in inutili tentativi di migliorare la lavorazione delle lenti al fine di migliorare il funzionamento del telescopio. Si trattava, a suo avviso, di sforzi inutili in quanto «partivano dal presupposto che la perfezione di un telescopio sia dovuta alle forme delle lenti» e non tenevano conto, invece, dei limiti che il comportamento di una lente aveva grazie alla natura stessa della luce e dei colori: la strada sino ad allora seguita nel perfezionamento dell'osservazione telescopica era quindi «un'impresa disperata» (Newton 1978, 57-58, 191).

Lavorando su fusioni di rame, arsenico e stagno, Newton costruì un piccolo riflettore a specchio. Lo specchio aveva un diametro di 25 mm, lo strumento telescopico era di circa 15 cm di lunghezza e un prisma a riflessione totale inviava i raggi ad un oculare disposto lateralmente:

Un primo dispositivo di questo tipo fu costruito attorno al 1668. Già nel 1671 Newton poteva inviare in omaggio a Carlo II uno strumento di dimensioni maggiori. Negli anni successivi egli si impegnò in tentativi di miglioramento delle leghe atte alla produzione di specchi, analizzando anche la possibilità di sostituire la superficie metallica con un menisco di vetro ricoperto da uno strato di mercurio.

Va tenuto presente che la ricerca volta alla produzione di telescopi basati sull'osservabilità di un'immagine data da specchi concavi risaliva ai primi decenni del Seicento, e cioè alle discussioni tra Galilei e alcuni suoi allievi, agli studi di Nicolò Zucchi (1586-1670), a considerazioni di Mersenne e di James Gregory. Molto probabilmente Newton non era a conoscenza di tali tentativi e ragionava in stretto riferimento a problemi teorici che sorgevano nell'ambito delle indagini che egli stesso conduceva sulla natura dei colori e della luce. Solo attorno alla metà del secolo successivo le conoscenze in ottica permisero a Euler di superare l'ostacolo che aveva bloccato Newton nella presa in considerazione dei fenomeni di aberrazione cromatica nelle lenti.

Gli anni della peste avevano dunque gettato semi fecondi per la matematica e per l'ottica. Per quanto riguarda la meccanica, come è noto, esiste un lungo intervallo tra gli studi compiuti da Newton attorno al 1666 e la prima edizione dei *Principia* (1687). I *Principia* furono scritti in un periodo di tempo relativamente breve, come si vedrà più avanti, e non è facile ricostruire le tappe del cammino percorso da Newton tra gli anni della peste e la composizione del suo capolavoro.

3. *Moti e struttura della materia.*

Un documento importante al fine di comprendere una parte delle idee sviluppate da Newton a proposito della struttura della materia e dei rapporti presumibili fra tale struttura e le grandi leggi regolatrici dell'universo è costituito da una lettera che il futuro autore dei *Principia* scrisse a Robert Boyle nel 1678. Essa divenne nota dopo la morte di Newton, in quanto fu pubblicata nel 1744 da Thomas Birch nelle opere di R. Boyle. Al centro di quel documento sta il concetto di etere: «Io suppongo — scrive Newton — che vi sia, diffusa ovunque, una sostanza eterea, capace di contrarsi e di

dilatarsi, fortemente elastica e, in breve, del tutto simile all'aria da ogni punto di vista, pur essendo molto più sottile di essa».

L'etere è presente anche all'interno dei corpi, e nei «pori» di questi ultimi esso è meno denso che nello spazio vuoto. Alla variazione di densità Newton attribuisce il compito di operare come «causa» di fenomeni tra loro molto diversi. Sembra, dalle parole di Newton, che i fenomeni considerati dall'ottica e dalla chimica siano in ultima istanza prodotti dal comportamento di corpuscoli in quell'etere. Concludendo la lettera, Newton entra anche nel merito della gravitazione, descrivendo la «causa» della gravità: «Farò l'ipotesi che l'etere consista di parti che differiscono l'una dall'altra in sottigliezza per gradi indefiniti; che nei pori dei corpi vi sia una quantità minore di etere più grossolano, in rapporto a quello più sottile, che nello spazio aperto; e che, di conseguenza, nel gran corpo della terra vi sia una quantità molto minore di etere più grossolano, in rapporto alla quantità di quello più sottile, che nelle regioni dell'aria».

Tenendo conto di queste congetture Newton pensa si possa sostenere che l'etere sia sempre più sottile scendendo dalla «cima dell'aria» sino al centro della Terra. La variazione di densità d'etere dovrebbe spiegare il comportamento di un corpo sospeso a una certa altezza o collocato sulla superficie della Terra. Comunque, termina Newton, si tratta di pure ipotesi, quasi fantasie non suffragate dai fatti (Cohen 1978, 252-254).

La lettera a Boyle, alcuni appunti sulle lezioni universitarie tenute da Newton, la sua corrispondenza con altri studiosi e le analisi sino ad oggi condotte sulla mole dei manoscritti inediti (che Newton compilava e raccoglieva con cura) rivelano che per molti anni il futuro autore dei *Principia* si interessò di un gruppo di questioni tra loro correlate: la struttura corpuscolare della materia e della luce, la natura dell'etere, le leggi di Galilei e di Keplero, le basi metafisiche della scienza di Cartesio, il rapporto tra creazione divina e regolarità del cosmo, la chimica, gli sviluppi della matematica o le applicazioni di quest'ultima nella risoluzione di problemi fisici sono aspetti diversi, ma fra loro intrecciati, degli studi avviati da Newton dopo gli anni della peste.

Un manoscritto — oggi noto con il titolo *Propositiones de motu* e presumibilmente elaborato da Newton nel 1684 — può essere considerato come una tappa importante tra gli studi ai quali ci siamo finora riferiti e la pubblicazione (avvenuta nel 1687) della prima edizione dei *Philosophiae naturalis principia mathematica*. Nelle *Propositiones* figurano infatti alcuni temi che si ritrovano in varie sezioni dei *Principia*, e che lo stesso Newton discusse nelle lezioni universitarie svolte nell'autunno del 1684. Un anno dopo, forse a seguito di pressioni esercitate da Edmund Halley (1656-1742), Newton dava inizio alla stesura dei *Principia*.

4. *Il contenuto dei* Principia.

I *Principia* sono organizzati in sezioni. All'inizio vengono enunciate alcune definizioni relative alla «quantità di materia», alla «quantità di moto» e alle «forze», nonché alcune considerazioni che fanno parte di uno Scolio dedicato ai concetti di spazio, di tempo e di moto. Secondo Newton occorre distinguere tra lo spazio assoluto — «per sua natura senza relazione ad alcunché di esterno» e «sempre uguale e immobile» — e lo spazio relativo. Quest'ultimo è la «misura dello spazio assoluto», il risultato di un'operazione realizzata dagli uomini. Considerazioni analoghe valgono per il tempo. Ne segue che quando si usa la parola «moto», bisogna distinguere tra un moto assoluto e uno relativo: il primo è infatti «la traslazione di un corpo da un luogo assoluto in un luogo assoluto», mentre il secondo riguarda la traslazione da un luogo relativo ad un altro.

Sorge un problema: è possibile distinguere un moto assoluto da un moto relativo? Supponiamo di prendere in considerazione un corpo collocato su una nave in movimento. Secondo Newton ha senso parlare di «moto vero ed assoluto» di quel corpo, intendendo per «moto vero ed assoluto » quel movimento che nasce «in parte dal moto vero della Terra nello spazio immobile, in parte dai moti relativi sia della nave sulla Terra, sia del corpo sulla nave». È comunque necessario stabilire il moto vero della Terra nello spazio assoluto, e per far ciò è indispensabile un punto di riferimento preciso, ovvero un luogo immobile. Scrive in proposito Newton: «I moti totali e assoluti non si possono definire che per mezzo di luoghi immobili... Ma non esistono luoghi immobili salvo quelli che dall'infinito per l'infinito conservano, gli uni rispetto agli altri, determinate posizioni; e così rimangono sempre immobili, e costituiscono lo spazio che chiamo immobile» (Newton 1965, 108).

La difficoltà di questa definizione non risiede soltanto nel linguaggio newtoniano, ma nella natura stessa del problema. Newton è perfettamente consapevole che «nelle cose umane» è lecito far riferimento a luoghi e a moti relativi. Ma, aggiunge subito, «nella filosofia occorre astrarre dai sensi», e cioè eliminare ogni riferimento a ciò che è legittimo utilizzare nella vita di ogni giorno. In altre parole, occorre legare i nostri ragionamenti sui moti a luoghi assoluti e a tempi assoluti, anche se, negli esperimenti e nelle misure sugli spostamenti compiuti dai corpi reali, non possiamo fare altro che ragionare su dati relativi.

A questo punto appare allora necessario introdurre una sottilissima analisi che riguarda «gli effetti per i quali i moti assoluti e relativi si distinguono gli uni dagli altri».

L'analisi prende in considerazione i moti circolari, e si basa sul celebre

esperimento del secchio rotante attorno al proprio asse. Il secchio sia appeso ad un filo, e sia fatto ruotare attorno al proprio asse sino a che il filo non si trovi in uno stato di grande torsione. A questo punto si versa dell'acqua nel secchio. Se teniamo fermo quest'ultimo, anche l'acqua rimane ferma al suo interno. Lasciamo ora libero il secchio: esso comincerà a girare su se stesso a causa della torsione del filo. Osserviamo ciò che accade sulla superficie dell'acqua. In un primo tempo essa mantiene una forma piana, ma poi, gradualmente, tale forma si modifica perché l'acqua comincia anch'essa a ruotare entro il secchio: «l'acqua comincerà a ritirarsi a poco a poco dal centro e salirà verso i lati del vaso, formando una figura concava». Ad un certo punto la figura concava si stabilizza. E allora si può dire che, in quel momento, l'acqua compie le «sue rivoluzioni insieme al vaso in tempi uguali»: tra acqua e vaso si ha quindi una «quiete relativa».

A parere di Newton la salita dell'acqua «indica lo sforzo di allontanamento dall'asse del moto, e attraverso tale sforzo si conosce e viene misurato il vero e assoluto moto circolare dell'acqua».

Lo scienziato, pertanto, non è limitato dalle esperienze a considerare solamente i moti relativi. Egli, attraverso lo studio dei moti circolari e delle forze agenti, può anche conoscere dei moti assoluti. Newton commenta il risultato raggiunto con una osservazione: «È difficilissimo in verità conoscere i veri moti dei singoli corpi e distinguerli di fatto dagli apparenti: e ciò perché le parti dello spazio immobile, in cui i corpi veramente si muovono, non cadono sotto i sensi. La cosa tuttavia non è affatto disperata» (*Ibid.*, 110).

Va tenuto presente che lo Scolio newtoniano sullo spazio, il tempo e il moto è un documento basilare da due punti di vista. In primo luogo esso contiene argomenti che, secondo Newton, debbono essere considerati come fondamenti (insieme alle definizioni di cui già s'è detto) della filosofia naturale. In secondo luogo esso implica una concezione dell'assoluto e del relativo che per più di due secoli rimarrà pressoché inalterata. Solo le critiche di Mach e le riflessioni di Albert Einstein riusciranno ad andare oltre quella concezione, nei travagliati anni compresi tra la fine dell'Ottocento e l'inizio del Novecento.

Dopo le definizioni e lo Scolio, Newton introduce un gruppo di assiomi o di leggi del movimento. Il gruppo degli assiomi è costituito dalle tre seguenti leggi:

I) Ciascun corpo persevera nel proprio stato di quiete o di moto rettilineo uniforme, eccetto che sia costretto a mutare quello stato da forze impresse.

II) Il cambiamento di moto è proporzionale alla forza motrice impressa, ed avviene lungo la linea retta secondo la quale la forza è stata impressa.

III) Ad ogni azione corrisponde una reazione eguale e contraria: ossia, le

azioni di due corpi sono sempre uguali fra loro e dirette verso parti opposte. (*Ibid.*, 113-116).

Il gruppo è seguito da alcuni corollari, quali ad esempio quello che riguarda il cosiddetto parallelogramma delle forze: «Un corpo spinto da forze congiunte, descriverà la diagonale di un parallelogramma nello stesso tempo nel quale descriverebbe separatamente i lati» (*Ibid.*, 117).

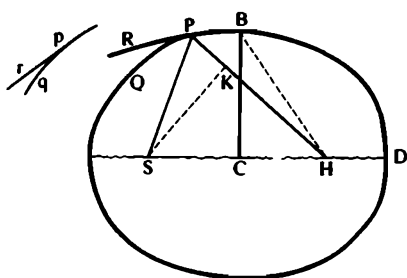
Newton non dimostra che le tre leggi sono vere. Le presenta al lettore come se fossero assiomi e, in uno Scolio collocato dopo i corollari, scrive semplicemente quanto segue: «Fin qui ho riferito i princìpi accolti dai matematici e confermati da numerosi esperimenti». Ad esempio Newton sostiene, nello Scolio, che Galilei conosceva le due prime leggi e i due primi corollari, e ne fece uso per ricavare la legge di caduta dei gravi e la legge sui moti parabolici dei proiettili (*Ibid.*, 126).

La prima sezione dei *Principia* è così completa: essa è costituita, quindi, da un gruppo di definizioni, di assiomi e di corollari, accompagnati da considerazioni sul significato che si deve attribuire alle qualificazioni di assoluto e relativo in rapporto ai concetti di spazio, di tempo e di moto.

Prende allora l'avvio il primo libro, dedicato al «Moto dei corpi». Questo libro è quasi completamente svolto in termini matematici, o, per meglio dire, in base a dimostrazioni di tipo geometrico. Dopo aver esposto un insieme di Lemmi, Newton infatti scrive che le dimostrazioni presentate al lettore possono essere trattate in modo più breve per mezzo del «metodo degli indivisibili», ma aggiunge di aver preferito non fare ricorso a quel metodo in quanto «l'ipotesi degli indivisibili è ardua, e poiché quel metodo è stimato meno geometrico» (*Ibid.*, 152). Si tratta comunque di una sezione davvero centrale dei *Principia*, anche se, molto probabilmente, questa sezione ebbe meno lettori in grado di coglierne il contenuto di quanto non possa far credere la fortuna immensa dei *Principia* tra vasti strati intellettuali del Settecento e dell'Ottocento. Basti qui citare, a puro titolo d'esempio, il teorema *IV* della sezione seconda del libro primo: «Le forze centripete dei corpi, che descrivono cerchi diversi con moto uniforme, tendono ai centri dei medesimi cerchi, e stanno fra loro come i quadrati degli archi descritti in tempi uguali divisi per i raggi dei cerchi». Questo teorema è accompagnato da un certo numero di corollari. Il sesto corollario afferma che: «Se i tempi periodici sono in ragione inversa della potenza 3/2 dei raggi e, per conseguenza, le velocità inversamente proporzionali alla radice quadrata dei raggi, le forze centripete saranno inversamente proporzionali ai quadrati dei raggi: e viceversa».

Newton così commenta: «Il caso del corollario sesto è proprio dei fenomeni celesti» (*Ibid.*, 163). La dimostrazione dei teoremi, insomma, non

è qualcosa di fine a se stesso: dalle dimostrazioni si ricava ciò che è indispensabile per spiegare il moto dei pianeti.

La successiva sezione del primo libro esamina i teoremi che riguardano il moto dei corpi nelle sezioni coniche eccentriche, e presenta la soluzione di problemi generali come il seguente: «Posto che la forza centripeta sia inversamente proporzionale al quadrato della distanza dei luoghi dal centro, e che sia conosciuta la quantità assoluta di quella forza, si ricerca la linea che un corpo descriverà muovendo da un luogo dato con una velocità assegnata secondo una data retta» (*Ibid.*, 186).

La soluzione di questo problema ci insegna che, a seconda dei valori assunti dalla velocità del corpo, quest'ultimo potrà percorrere un'ellisse, una parabola oppure un'iperbole. Le rimanenti sezioni del primo libro sviluppano altri argomenti di meccanica. Le sezioni *XII* e *XIII* trattano ad esempio i teoremi sulle forze attrattive esercitate rispettivamente dai corpi sferici e da quelli non sferici. Newton riesce a dimostrare che, dato «un corpuscolo» collocato esternamente alla superficie di una «sfera», il corpuscolo «è attratto verso il centro della sfera con una forza inversamente proporzionale al quadrato della sua distanza dallo stesso centro» (*Ibid.*, 341). Vengono così poste le fondazioni matematiche per una teoria soddisfacente delle interazioni gravitazionali, mentre nell'ultima sezione sono analizzati brevemente i moti «dei corpi piccolissimi», e cioè quei moti che, secondo Newton, provocano i fenomeni ottici della riflessione e della rifrazione.

Il secondo libro è la parte più delicata dei *Principia*. In esso Newton cerca di sviluppare una trattazione matematica e sperimentale di un settore difficilissimo della meccanica, e cioè il settore che riguarda il moto dei corpi all'interno di un fluido resistente. L'insieme dei problemi affrontato è effettivamente complesso, e non si deve dimenticare che non sempre Newton riesce a trovare soluzioni convincenti. D'altra parte la meccanica dei fluidi trova nei *Principia* una prima ed originale esposizione, che consente alla fisica

di raggiungere due mete di rilievo. La prima consiste nella possibilità di evitare le obiezioni che erano state fatte contro la fisica galileiana, in quanto quest'ultima non aveva gli apparati teorici capaci di prendere effettivamente in considerazione il comportamento di un corpo che si muove in un mezzo resistente ma era spesso obbligata a esaminare solamente dei casi ideali di moto nel vuoto; la seconda consiste invece nell'impulso che questa parte dei *Principia* fu in grado di imprimere alle ricerche sull'idrodinamica.

A questo proposito è utile riprendere un tema al quale s'è già fatto cenno nel paragrafo 3 del capitolo XIV — «La materia del fuoco e la natura della luce» —, là dove si ricordava come Newton fosse intervenuto per dimostrare teoremi sui fluidi elastici. Il Teorema XVIII, Sezione V del libro secondo, dice: «Se la densità di un fluido, costituito da particelle che si sfuggono fra loro, sta come la compressione, le forze centrifughe delle particelle sono inversamente proporzionali alle distanze dei loro centri. E viceversa, le particelle che si sfuggono mutuamente, con forze che sono inversamente proporzionali alle distanze dei loro centri, costituiscono un fluido elastico la cui densità è proporzionale alla compressione». Dopo aver fornito una dimostrazione geometrica del teorema, Newton analizza, in uno Scolio immediatamente successivo, il caso generale così enunciabile: «E in generale, se si pone D come distanza ed E come densità del fluido compresso, e le forze centrifughe sono inversamente proporzionali ad una potenza qualsiasi D^n della distanza, il cui esponente è il numero n, le forze di compressione staranno come i lati cubici della potenza E^{n+2}, il cui esponente è $n+2$, e viceversa» (*Ibid.*, 477-479).

La situazione creata dal Teorema XVIII è problematica. Esso fa intervenire forze repulsive con andamento del tipo $1/r^n$, dove r è la distanza tra particelle. Si tratta di interazioni che agiscono anche a grandi distanze, e che debbono in qualche modo essere troncate per non far nascere paradossi: «Perché, se la virtù di una particella qualsiasi si propagasse all'infinito, sarebbe necessaria una forza maggiore per produrre un'eguale condensazione di una maggiore quantità di fluido». La soluzione adottata da Newton è fortemente ad hoc. Egli si basa su una ipotetica analogia fra le interazioni repulsive del Teorema XVIII e «la virtù del magnete», che «ha quasi termine in prossimità» del magnete stesso. La conclusione è allora che le forze centrifughe delle particelle «sono delimitate dalle particelle più vicine, o non si diffondono molto oltre ». L'interazione, insomma, viene tagliata per valori piccoli di r, senza che sia possibile giustificare il taglio se non in funzione di analogie non del tutto plausibili. Questo stato di cose genererà problemi per decenni, sia nelle ricerche matematiche sulla corda vibrante e la fibra sonora del Settecento, sia nell'ambito della teoria del calore e dei gas secondo Laplace.

Va altresì detto che il secondo libro è stato spesso giudicato come una parte del capolavoro newtoniano che non si inseriva armoniosamente nel complesso dei *Principia*, se non in quanto esaminava problemi la cui soluzione si prestava ad essere messa in gioco come arma critica nei confronti della fisica di Cartesio. Questa valutazione è solo in parte giusta. La fisica cartesiana dei vortici era un ostacolo che Newton intendeva abbattere, e una buona teoria dei fluidi rappresentava in tal caso un ottimo strumento critico. Tuttavia la teoria newtoniana dei fluidi non si riduce a questo solo aspetto. Essa è parte integrante della meccanica se si ammette una delle implicazioni più profonde della teoria matematica di Newton, e cioè l'implicazione per la quale è possibile unificare in una sola teoria la fisica del moto terrestre galileiana e la fisica dei moti planetari. Sotto il profilo dell'unificazione, la teoria dei fluidi è una parte essenziale della meccanica.

Ciò non toglie che la teoria dei fluidi sia davvero una potente arma contro la fisica cartesiana. Nello Scolio che chiude il secondo libro quest'arma porta Newton a dichiarare, senza mezzi termini, che «l'ipotesi dei vortici urta totalmente contro i fenomeni astronomici, e conduce non tanto a spiegare quanto ad oscurare i moti celesti» (*Ibid.*, 593). Il lettore dei *Principia* è infatti invitato a tenere presente che solo i teoremi del primo libro permettono di capire «in qual modo questi moti si effettuino negli spazi liberi indipendentemente dai vortici». In tal modo Newton stabilisce un rapporto tra i primi due libri e il terzo, che è dedicato espressamente al «sistema del mondo» e nel quale si discute di astronomia.

Il terzo libro inizia con la seguente considerazione: «Nei libri precedenti ho trattato i Princìpi della Filosofia, non filosofici tuttavia, ma soltanto matematici, a partire dai quali, però, si può discutere di cose filosofiche». Dati i princìpi, e cioè il gruppo delle definizioni, degli assiomi, dei teoremi e delle dimostrazioni, «rimane da insegnare — scrive Newton — l'ordinamento del sistema del mondo», intendendo che questo ordinamento si può ricavare dai princìpi stessi (*Ibid.*, 601-602).

Per il passaggio dai princìpi al sistema del mondo Newton pensa sia necessario fissare alcune «regole del filosofare», viste come guide per chi desidera andare dalla geometria del primo libro ai moti del sistema solare. È quanto mai opportuno, allora, citare le quattro regole newtoniane, attraverso la rielaborazione nella seconda edizione dei *Principia*. La prima sostiene che «delle cose naturali non devono essere ammesse cause più numerose di quelle che sono vere e bastano a spiegare i fenomeni». La seconda afferma che, una volta ammessa la prima regola, «finché può essere fatto, le medesime cause vanno attribuite ad effetti naturali dello stesso genere». La terza regola mette in discussione il significato delle qualità dei corpi e stabilisce che esse «non si conoscono altrimenti che per mezzo di esperi-

menti». La quarta e ultima regola, infine, prende in considerazione il problema dell'induzione: «Nella filosofia sperimentale, le proposizioni ricavate per induzione dai fenomeni, devono, nonostante le ipotesi contrarie, essere considerate vere o rigorosamente o quanto più possibile, finché non interverranno altri fenomeni, mediante i quali o sono rese più esatte o vengono assoggettate ad eccezioni» (*Ibid.*, 603-607).

Avendo stabilito quali siano le regole, Newton passa ad un elenco di fenomeni. Si tratta di descrizioni quali la seguente: «I cinque pianeti primari, Mercurio, Venere, Marte, Giove e Saturno cingono il Sole con le proprie orbite». Ogni descrizione di un fenomeno è accompagnata da considerazioni di tipo sperimentale. Così, ad esempio, è ragionevole dire che Mercurio e Venere ruotano attorno al Sole perché quei pianeti esibiscono fasi analoghe a quelle della Luna.

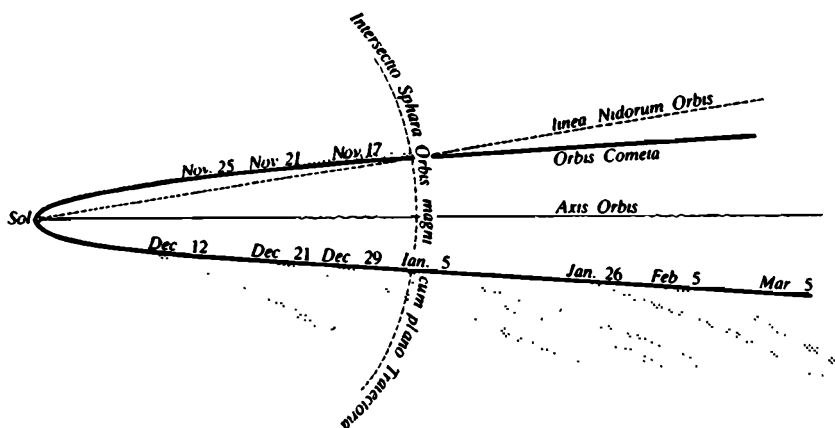
Dopo le regole e i fenomeni, il terzo libro contiene una serie di proposizioni — alcune delle quali in forma di teorema — grazie alle quali viene concretamente realizzato il passaggio dalla teoria matematica del primo libro alla situazione effettiva esistente nell'universo. Anche in questo caso un esempio può essere utile per comprendere lo schema dei *Principia*. La proposizione *XIII* — che Newton indica anche come Teorema *XIII* — afferma quanto segue: «I pianeti sono mossi lungo ellissi che hanno un fuoco nel centro del Sole, e, con i raggi condotti a quel centro, descrivono aree proporzionali ai tempi». Si tratta di proposizioni ad altissimo contenuto teorico, la cui generalità e dimostrabilità portano all'unificazione della scienza galileiana e kepleriana. Non a caso, infatti, Newton scrive: «Conosciuti i princìpi dei moti, da questi ricaviamo *a priori* i moti celesti» (*Ibid.*, 637). Non credo sia il caso di sottolineare l'aspetto meraviglioso di simili operazioni concettuali, grazie alle quali Newton riesce a costruire catene di ragionamenti i cui esiti sono conformi alla realtà del sistema planetario. I *Principia*, così come apparvero in prima edizione nel 1687, si chiudono con la trattazione del moto delle comete.

5. *La seconda edizione dei* Principia *e lo Scolio Generale.*

Nella stesura dei *Principia* Newton aveva fatto leva sul tradizionale metodo delle dimostrazioni geometriche. L'opera del 1687, comunque, rappresentava una sfida per il lettore medio, comprendendo in quest'ultima categoria di lettori anche uomini come John Locke. Si sa, ad esempio, che Locke si rivolse a Huygens per avere assicurazioni sulla validità dei teoremi newtoniani, e che Richard Bentley si propose di studiare alcuni testi introduttivi al fine di poter capire le pagine dei *Principia*. Lo stesso Newton aveva pensato di scrivere una versione divulgativa del terzo libro: tale

versione venne pubblicata postuma, sotto il titolo di *De mundi systemate*.

Edmond Halley, che aveva stimolato Newton affinché scrivesse l'opera e che aveva anche sostenuto le spese di pubblicazione della stessa, intervenne sulla rivista «Philosophical Transactions» con una recensione dei *Principia* nella quale dichiarava che Newton aveva pressoché condotto a termine l'impresa di conoscere il mondo, e che ben poco rimaneva da fare per coloro che dopo Newton avrebbero compiuto ricerche in questo argomento. Dopo i *Principia*, scriveva Halley, non è più possibile credere nella dottrina cartesiana dei vortici: i primi due libri dell'opera newtoniana insegnano infatti i princìpi generali a partire dai quali il terzo libro spiega «i principali fenomeni della natura».

L'entusiasmo di Halley non poteva tuttavia cancellare i pregiudizi che ostacolavano la credibilità dei *Principia* e che avevano radici profonde ed estese in una cultura notevolmente influenzata dalla concezione cartesiana della fisica. Quest'ultima concezione aveva il pregio di poter essere compresa nelle sue linee generali senza dover affrontare problemi matematici di difficile soluzione, di poter essere discussa senza violare le conoscenze del senso comune e di presentarsi immediatamente, per la sua stessa natura, a riflessioni filosofiche di notevole interesse. Non a caso le stesse università inglesi, ancora nel secondo decennio del Settecento, usavano quasi sempre testi basati sulle teorie cartesiane, anche se, come ricorda Alberto Pala nella introduzione all'edizione italiana dei *Principia*, le università di St. Andrews e di Edimburgo accolsero l'opera di Newton come testo ufficiale per l'insegnamento della geometria e della fisica.

Il moto di una cometa nei *Principia*.

Si deve inoltre tenere presente che le tesi newtoniane sulla gravitazione non potevano che apparire strane a intellettuali che ritenevano fondamentale il compito di studiare la natura del moto. Quest'ultima non era l'oggetto dei *Principia*, i quali puntavano invece a stabilire alcuni assiomi che consentissero di ricavare a priori quelli che Newton indicava come *fenomeni*, senza entrare nel merito della causa della gravitazione. Da una parte giungevano critiche secondo le quali introdurre la gravitazione costituiva un ritorno alle cause «occulte» che erano state duramente combattute da Cartesio e da molti altri. Dall'altra parte si diffondeva il sospetto che la teoria di Newton contenesse i germi dell'ateismo, in quanto poteva far pensare a un meccanicismo che sollevava intricati problemi teologici. Nello stesso tempo i *Principia* avevano alcuni punti deboli, quali ad esempio quelli che riguardavano certi errori o imperfezioni e che dovevano assolutamente essere eliminati.

Esistevano quindi molte ragioni per preparare una seconda edizione. Essa apparve nell'estate del 1713, grazie anche ad un intenso lavoro del matematico Roger Cotes. La seconda edizione presentava alcune interessanti modificazioni rispetto alla prima. In particolare, essa conteneva una battagliera prefazione di Cotes e alcune pagine conclusive scritte da Newton e note come Scolio Generale.

Prima di riassumere la prefazione di Cotes è opportuno ricordare che Newton, nella prefazione alla prima edizione, aveva invitato i lettori a tenere conto di un fatto. Gli antichi, osservava Newton, ritenevano che la meccanica fosse essenziale per «investigare le cose della natura». Essi avevano sviluppato due forme di meccanica. L'una, detta *razionale*, era formata da dimostrazioni, e l'altra, detta *pratica*, comprendeva le arti manuali. In tale suddivisione la geometria era una parte della meccanica stessa, e, come scrive Newton, «la *meccanica razionale* sarà la scienza dei moti che risultano da forze qualsiasi, e delle forze richieste da moti qualsiasi, esattamente esposta e dimostrata». Gli studiosi moderni, come si legge nella prefazione di Newton, «abbandonate le forme sostanziali e le qualità occulte, tentarono di ridurre i fenomeni della natura a leggi matematiche». I *Principia* dovevano pertanto inserirsi, secondo il loro autore, in un solco già tracciato da lungo tempo: Newton sosteneva infatti che il compito che egli si prefiggeva era quello di «coltivare la *matematica* per quella parte che attiene alla *filosofia*», dove il termine «filosofia» indicava la filosofia naturale, e cioè l'indagine fisica sul mondo (*Ibid.*, 55-58).

Roger Cotes, nella prefazione del 1713, divideva gli studiosi di fisica in tre gruppi. Al primo gruppo appartenevano i seguaci di Aristotele. Essi pretendevano di analizzare le nature dei corpi ma, in realtà, non avevano nulla da insegnare poichè parlavano solamente dei «nomi delle cose» e non delle «cose stesse». Il secondo gruppo, principalmente rappresentato dai

seguaci di Cartesio, comprendeva coloro che volevano ricondurre la varietà delle forme a poche relazioni semplici, ma che esageravano nel formulare ipotesi. Essi, scrive Cotes, «cadono nei sogni, in quanto hanno trascurato la reale costituzione delle cose». Il terzo gruppo era infine formato da quegli studiosi che seguivano la filosofia sperimentale e che «non assumono come principio niente che non sia stato provato dai fenomeni». Naturalmente Newton faceva parte di quest'ultimo gruppo, ed era «il primo e il solo» che era stato capace di dedurre «la spiegazione del sistema del mondo dalla teoria della gravitazione» dopo aver ricavato quest'ultima mediante un accurato esame di fenomeni osservabili sulla Terra e nel cielo.

«Sento che alcuni disapprovano questa conclusione — scriveva polemicamente Cotes —, e borbottano non so che circa le qualità occulte. Sono soliti ciarlare continuamente del fatto che la gravità specialmente è un *quid*, e che, per la verità, le cause occulte debbono essere bandite dalla filosofia. Ma a costoro si risponde che cause occulte non sono quelle la cui esistenza si dimostra chiaramente per mezzo di osservazioni, ma soltanto quelle la cui esistenza è occulta e inventata e ancora non è stata provata. La gravità, dunque, non sarà la causa occulta dei moti celesti; se qualcosa, infatti, è appalesato dai fenomeni, è che questo potere esiste di fatto. Piuttosto, nelle cause occulte si rifugiano coloro che propongono alla guida di questi movimenti non so che vortici di materia interamente immaginata e affatto sconosciuta ai sensi» (*Ibid.*, 71).

Secondo Cotes i veri seguaci delle cause occulte erano, dunque, coloro i quali ragionavano in termini di vortici. D'altra parte, respingendo la falsa filosofia dei vortici cartesiani, Newton aveva aperto all'uomo la via per una comprensione della «compagine elegantissima del sistema del mondo», e, nello stesso tempo, aveva insegnato a «rispettare ed adorare il fondatore e il signore del'universo»: pertanto i *Principia* costituivano una «fortezza munitissima contro l'assalto degli atei», come aveva ben capito Richard Bentley (*Ibid.*, 81-82).

La citazione del nome di Bentley, come si vedrà tra poco, era ricca di implicazioni sul piano teologico ed era un elemento prezioso al fine di allontanare da Newton il sospetto di ateismo. Prima di trattare dei rapporti tra Bentley e Newton, tuttavia, è meglio prendere in considerazione lo Scolio Generale con il quale la seconda edizione dei *Principia* si chiude. Le tesi esposte nello Scolio, infatti, esercitarono una grande influenza sui dibattiti sul metodo scientifico che si svilupparono dopo Newton.

Nelle poche pagine dello Scolio Generale si esaminano quattro problemi tra loro collegati. Il primo riguarda i vortici e il vuoto. I vortici debbono essere eliminati per poter veramente spiegare i moti celesti che avvengono nel vuoto e che sono governati dalla legge di gravità. L'eliminazione dei vortici fa

tuttavia sorgere un secondo problema. Infatti i pianeti e i loro satelliti hanno moti regolari, ed è giusto chiedere quale sia la causa di tale regolarità. Newton risponde che i moti regolari «non hanno origine da cause meccaniche» ma sono il risultato del disegno divino. Il terzo problema, infatti, è il problema di Dio: «Da una cieca necessità metafisica, che è assolutamente identica sempre e ovunque, non nasce alcuna varietà di cose. L'intera varietà delle cose create, per luoghi e per tempi, poté essere fatta nascere soltanto dalle idee e dalla volontà di un ente necessariamente esistente» (*Ibid.*, 795).

L'ultimo problema dello Scolio Generale ha come oggetto lo spinoso tema della «causa della gravità». Newton esclude che possa trattarsi di una causa meccanica e ammette di conoscere solamente le proprietà della gravitazione che risultano dagli esperimenti. A questo punto lo Scolio Generale enuncia l'argomento celeberrimo sulle ipotesi: «In verità non sono ancora riuscito a dedurre dai fenomeni la ragione di queste proprietà della gravità, e non invento ipotesi. Qualunque cosa, infatti, non deducibile dai fenomeni, va chiamata *ipotesi*; e nella filosofia *sperimentale* non trovano posto le ipotesi sia metafisiche, sia fisiche, sia delle qualità occulte, sia meccaniche. In questa filosofia le proposizioni vengono dedotte dai fenomeni, e sono rese generali per induzione». Per quanto attiene alla fisica, dunque, «è sufficiente che la gravità esista di fatto, agisca secondo le leggi da noi esposte, e spieghi tutti i movimenti dei corpi celesti e del nostro mare».

Lo Scolio, tuttavia, non termina con questa dichiarazione metodologica, ma prosegue con alcune righe dedicate all'etere, che Newton definisce come «quello spirito sottilissimo che pervade i grossi corpi e che in essi si nasconde». È l'etere, ammette Newton, che con la sua forza e le sue azioni fa sì che le particelle interagiscano tra loro a brevi distanze, che si manifestino le interazioni tipiche dei corpi elettrizzati, che siano osservabili i fenomeni luminosi e che sia possibile la sensazione stessa, dovuta alle «vibrazioni di questo spirito». «Ma — conclude Newton — queste cose non possono essere esposte in poche parole; né vi è sufficiente abbondanza di esperimenti, mediante i quali le leggi delle azioni di questo spirito possano essere accuratamente determinate e mostrate» (*Ibid.*, 796).

Come si può conciliare la regola dello Scolio Generale che vieta di fare ipotesi e che invita gli studiosi ad accettare una teoria per la quale «è sufficiente che la gravità esista di fatto», con la conclusione dello Scolio stesso, nella quale il lettore è rinviato allo «spirito sottilissimo» di cui già Newton aveva ad esempio parlato nella lettera a Boyle?

Non è agevole trovare una risposta. Come molti storici hanno ormai dimostrato, Newton evitava quasi sempre le occasioni di discutere sulle ipotesi, in quanto desiderava rimanere estraneo, nei limiti del possibile, alle

dispute. Ciò evidentemente crea difficoltà di ogni genere nell'interpretazione delle pagine newtoniane, anche perché è ormai noto che, nella sua pratica scientifica, Newton violava con notevole frequenza le regole filosofiche e metodologiche pubblicate nei *Principia*. La lettera a Boyle, nella quale l'etere appariva come un mezzo le cui proprietà fisiche avrebbero potuto spiegare l'attrazione tra i corpi, non è per fortuna il solo documento che Newton ci abbia lasciato. Sono particolarmente interessanti, per quanto riguarda le ipotesi sulla gravitazione, le lettere che Newton inviò a Richard Bentley, l'illustre filologo e studioso di problemi religiosi che Roger Cotes aveva citato nella prefazione alla seconda edizione dei *Principia*. Quando nel 1687 era apparsa la prima edizione, Bentley non aveva accettato l'opinione dei molti che respingevano le spiegazioni newtoniane come insensate. Grazie all'aiuto del matematico John Craige, Bentley cercò in un primo tempo di studiare dei testi che gli consentissero di leggere e di capire i *Principia*. Rendendosi conto delle difficoltà insuperabili dell'impresa, Bentley si rivolse direttamente a Newton, il quale gli consigliò una lettura ridotta delle prime pagine del libro e dell'ultima sezione dedicata all'astronomia. Bentley seguì i consigli di Newton e fece ampi riferimenti ai *Principia* durante una fortunata serie di conferenze dedicate alla confutazione dell'ateismo: a suo avviso, infatti, la teoria newtoniana dimostrava che l'armonia dell'universo non era il riflesso o il risultato di un ordine di tipo meccanicistico, ma il prodotto della volontà divina. In tal modo gli assiomi e i teoremi di Newton diventavano strumenti critici per demolire le concezioni corpuscolari derivanti da Lucrezio e per svuotare le idee sostenute dall'atea e empia filosofia di Thomas Hobbes.

Tra il dicembre del 1692 e il febbraio del 1693 Newton scrisse a Bentley quattro lettere che divennero note ad un pubblico più vasto solo nel 1756. Nella seconda lettera si può leggere come Newton fosse desideroso di allontanare da sé ogni sospetto e ogni critica a proposito della «causa» della gravità: «Voi parlate a volte della gravità come essenziale e inerente alla materia. Vi prego di non attribuirmi una simile nozione; infatti la causa della gravità è ciò che io non pretendo di conoscere». La terza lettera era ancor più esplicita: «È inconcepibile che la materia bruta e inanimata possa, senza la mediazione di qualcosa di diverso che non sia materiale, operare ed agire su altra materia senza contatto reciproco, come dovrebbe appunto accadere se la gravitazione nel senso epicureo fosse essenziale o inerente alla materia stessa. E questa è la ragione per cui desidero che non mi si attribuisca la gravità come innata. Che la gravità possa essere innata, inerente e essenziale alla materia, così che un corpo possa agire su un altro a distanza e attraverso un *vuoto*, senza la mediazione di qualcosa grazie a cui e attraverso cui l'azione e la forza possano essere trasportate dall'uno all'altro, ebbene, tutto ciò è per me un'assurdità così grande, che io non credo che un uomo il quale abbia in

materia filosofica una capacità di pensare in modo reale, possa mai cadere in essa. La gravità deve essere causata da un agente che agisca sempre secondo certe leggi; e ho lasciato alla considerazione dei miei lettori il problema se quell'agente è materiale o immateriale» (Cohen 1978, 271-312).

Questo passo deve far riflettere. Chi legge i *Principia* nella prima e nella seconda edizione, infatti, non ha elementi sufficienti per capire l'effettiva posizione di Newton nei confronti dell'etere e della gravità. Non a caso la diffusione del newtonianesimo passò attraverso una lettura dei *Principia* nella quale svolgevano un ruolo di primissimo piano le argomentazioni contenute nello Scolio Generale: per circa due secoli, generazioni di intellettuali nutrirono l'opinione che al centro del metodo trionfante di Newton stesse il celebre motto *Hypotheses non fingo*. Eppure, nel cuore stesso delle ricerche realmente svolte da Newton, le ipotesi — ivi comprese le ipotesi sull'etere — svolsero un ruolo fondamentale. La terza lettera a Bentley, se non altro, sta a testimoniare come Newton fosse lontano da quella immagine della gravitazione che nel Settecento e nell'Ottocento fu invece coltivata come una genuina raffigurazione della scienza dei *Principia*. Nessuno fu più antinewtoniano di Isaac Newton, se essere newtoniani significa, come significò per generazioni di studiosi, credere che l'azione gravitazionale sia un'azione a distanza che si esercita nel vuoto.

6. *Struttura della materia, chimica, alchimia.*

Tra i moltissimi manoscritti lasciati da Newton figurano pochi fogli, raccolti come *Conclusio*, che quasi sicuramente furono stesi in vista della prima edizione dei *Principia*. Gli argomenti della *Conclusio* possono rappresentare un primo passo per il lettore che desideri penetrare nel pensiero di Newton, e vale la pena di dare un sommario di alcuni di essi. Il manoscritto comincia con la tesi secondo cui, una volta data la spiegazione del «sistema di questo mondo visibile», occorre anche rivolgere l'attenzione agli «altri innumerevoli moti locali» che non possono essere osservati perchè tipici di particelle minuscole ma comunque presenti nei corpi caldi e in tutti i corpi soggetti a fermentazioni, putrefazioni o mutamenti dovuti alla crescita, nonché negli organi di senso. Se si accetta l'idea che la natura sia straordinariamente semplice, allora si deve anche accettare l'opinione secondo cui «ogni ragionamento che è valido per i moti maggiori, deve anche essere valido per quelli minori» (A.R. Hall, M. Boas Hall 1978, 321), e cioè per i moti non osservabili di cui si è appena detto.

Le forze della gravità, del magnetismo e dell'elettricità, secondo Newton, mostrano l'esistenza di azioni naturali di vario genere: e la chimica è in tal senso ricca di insegnamenti, poiché dalla chimica possiamo imparare che le

particelle non solo si attraggono, ma anche si respingono a seconda dei casi e delle sostanze, come dimostra il comportamento di una miscela di metallo e di acido. È quindi necessario, scrive Newton, proseguire negli esperimenti al fine di accertare la presenza di forze diverse da quelle che rientrano nella gravità, e ricorrere, anche nel caso di queste forze, al ragionamento matematico che ha già consentito di spiegare i moti planetari e i moti delle cose visibili in cielo e in terra. Infatti «la materia di tutte le cose è una, e si trasmuta in forme innumerevoli grazie alle operazioni della natura». Il tema dominante nel manoscritto è quello che riguarda «le forze delle particelle», dalle quali, secondo Newton, dipendono tutti i fenomeni naturali, dalla propagazione del calore all'eccitazione della retina, dalle reazioni chimiche alla sensazione del gusto.

I temi dominanti la *Conclusio* rinviano lo studioso a un Newton diverso da quello che una certa storiografia ha creduto di poter reperire nelle sole dimostrazioni geometriche dei *Principia*. Si tratta, invero, di temi che con maggiore evidenza appaiono durante la lettura del trattato sull'ottica, e che parlano di un Newton che indaga sulla struttura della materia rivolgendo i propri interessi a campi di ricerca diversi da quelli caratteristici della meccanica razionale. Ed è a questo Newton che ci si deve rivolgere al fine di avere chiarimenti sullo Scolio Generale: il Newton che analizza i problemi connessi con la struttura della materia e che studia su testi di chimica e di alchimia.

Si discute da tempo sui rapporti tra queste indagini newtoniane e la tradizione di studi legata all'alchimia. È certo che Newton prese in esame testi alchemici e studiò van Helmont o George Starkey. Almeno una decima parte della sua biblioteca era costituita da libri di alchimia, e si sa che egli fece esperimenti e stese appunti relativi a problemi caratteristici della cultura alchemica. Non fu immune, insomma, da influenze culturali le cui origini vanno trovate nella tradizione ermetica, nella tensione intellettuale di coloro che volevano scoprire i segreti nascosti nella natura, nei sogni di chi puntava molte speranze su una scienza che privilegiava il desiderio di mutare gli elementi rispetto al fascino di spiegare i fenomeni osservabili. Non si può tuttavia sottovalutare un altro tipo di influenza che si esercitò sulla formazione intellettuale di Newton: l'influenza della chimica di Boyle. L'approccio seguito da Boyle condizionò gli interessi alchemici newtoniani, nel senso che Newton, pur ritenendo — non a torto — che la tradizione alchemica potesse insegnare qualcosa di serio, affrontò quella tradizione con programmi di ricerca che non si limitavano a proseguire lungo le vie misticheggianti già tracciate nel passato e volutamente descritte con linguaggi allusivi e fuorvianti, ma che tendevano a ricostruire in forme controllabili le eventuali conoscenze che chi aveva percorso quelle vie poteva avere acquisite.

Non esiste, insomma, un salto brusco fra certi passi della *Conclusio* o degli argomenti newtoniani sull'alchimia, e la rigorosa geometrizzazione della meccanica che sta al cuore dei *Principia*. Esiste invece una rete complessa di rapporti che una lettura delle varie edizioni dell'*Ottica* può almeno in parte contribuire ad illuminare. Newton non era un meccanicista, e la sua concezione della struttura della materia era pertanto ricca di implicazioni e di problemi irrisolti che andavano oltre il pur grandioso scenario della meccanica razionale. Le pagine dell'*Ottica* testimoniano infatti dell'abisso che separa le idee di Newton da quelle di coloro che, seguendo i canoni del cartesianesimo, si limitavano a pensare che la natura fosse veramente riducibile, senza residui, ad un rigido schema meccanicistico.

7. *I problemi dell'*Ottica.

«Desidero evitare di essere coinvolto in tali fastidiose dispute prive di significato», aveva scritto Newton a Oldenburg nel dicembre del 1675. Le «fastidiose dispute senza significato» erano quelle che s'erano accese attorno alle ipotesi, in conseguenza della memoria sul comportamento della luce emergente da un prisma di cui già si è parlato in precedenza. Tuttavia Newton, scrivendo a Oldenburg, entrava direttamente nel merito delle ipotesi. Egli partiva dall'ammissione dell'esistenza di un mezzo etereo molto simile all'aria ma ben più rarefatto ed elastico di quest'ultima. L'etere riempiva l'universo e svolgeva una funzione fondamentale, in quanto, per usare le parole di Newton, «è forse probabile che tutte le cose siano originate dall'etere». Come già si è detto nel paragrafo 2, secondo Newton il mezzo etereo era capace di entrare in vibrazione e di interagire con la luce. Newton precisava che la luce non era costituita dalle vibrazioni dell'etere. La luce poteva essere formata da «corpuscoli di diverse dimensioni, inconcepibilmente piccoli e veloci, che scaturiscono da corpi luminosi», oppure da «qualsiasi altra cosa». Si poteva comunque accettare di dire che la luce era formata da «raggi successivi», senza entrare nel merito della natura di tali raggi. Era invece importante stabilire in qual modo l'etere e la luce agissero l'uno sull'altra. Secondo Newton l'etere rifrangeva i raggi e questi ultimi lo riscaldavano: ma il punto centrale era costituito dal fatto che la luce, viaggiando attraverso il mezzo etereo, «riceve un continuo impulso o una tendenza a recedere da quel lato verso l'etere più rarefatto». L'impulso accelera o ritarda la luce, dunque, quando quest'ultima viaggia attraverso zone nelle quali la densità dell'etere non è costante.

Come è possibile spiegare il fatto per cui dei raggi luminosi che incidono su una data superficie — di cristallo, di vetro o d'acqua — vengono in parte riflessi e in parte rifratti? A questo proposito Newton scrive che i raggi

provocano vibrazioni eteree, e che queste ultime si propagano in ogni direzione producendo delle dilatazioni e delle contrazioni nel mezzo etereo: se un raggio incide sulla superficie in un momento in cui l'etere è contratto o compresso vicino ad essa, allora il raggio non può attraversare la superficie e subisce una riflessione. Se, al momento dell'impatto, la superficie è invece caratterizzata dalla presenza di etere in fase di dilatazione o di espansione, allora la luce potrà passare e si potrà osservare il fenomeno della rifrazione.

È innegabile che Newton stia presentando un complesso di congetture su eventi non osservabili. Ma è ancor più interessante tener conto del giudizio che l'autore dei *Principia* — apparentemente desideroso di non entrare in dispute prive di significato — espone a Oldenburg: le interazioni tra etere e luce fanno sì che «la scienza dei colori diviene una speculazione più propria ai matematici che ai naturalisti».

La questione ottica, in altri termini, non può più essere pensata come una raccolta di fatti da inserire in catalogo, ma deve invece essere ripensata dalle fondamenta — senza naturalmente rinunciare ai contributi decisivi dell'esperienza, ma interpretando questi ultimi per mezzo di argomentazioni matematiche. Le parole di Newton a Oldenburg chiariscono dunque come l'intervento newtoniano sulla scomposizione della luce attraverso un prisma non fosse semplicemente una esercitazione condotta lungo le linee direttrici di una tradizione già confermata da moltissimo tempo. Newton lavorava sui problemi dell'ottica secondo una prospettiva divergente rispetto a quella tradizionale, e riteneva che quei problemi dovessero rientrare nel campo della matematica piuttosto che in quello tipico della usuale ricerca dei naturalisti. La tendenza ad evitare ogni polemica sulle ipotesi derivava certamente, almeno in parte, dal carattere particolare di Newton. Ma essa aveva, nello stesso tempo, origini diverse, nel senso che probabilmente Newton non voleva che la nuova scienza dei fenomeni ottici che egli stesso stava edificando si riducesse ad una pura e semplice battaglia tra congetture che, di per se stesse, non spiegavano alcunché.

Quando, nel 1704, appare la prima edizione dell'*Ottica* — *Opticks: or, a treatise of the reflexions, refractions, inflexions and colours of light. Also two treatises of the species and magnitude of curvilinear figures*, con una sezione rivolta a problemi matematici — il lettore può pensare che Newton stia riproponendo, per lo studio dei fenomeni luminosi, lo stesso identico schema che già era stato usato nei *Principia*. Il primo dei tre libri dell'*Ottica*, infatti, comincia con le seguenti parole: «Il mio scopo in questo libro è di spiegare le proprietà della luce non mediante ipotesi, bensì di proporle e di provarle mediante la ragione e gli esperimenti. In ordine a ciò premetterò le seguenti definizioni e i seguenti assiomi» (Newton 1978, 303). Eppure il contenuto dell'*Ottica* è ben più intricato e problematico di quello dei *Principia*, come il

nostro lettore immaginario potrebbe capire confrontando tra loro la prima edizione del 1704, la seconda del 1706 e la terza del 1717, e poi riflettendo sulle differenze tra esse esistenti. Si potrebbe dire, per amor di brevità, che tali differenze hanno come oggetto l'etere. Questo mutamento è tuttavia avvertibile soprattutto nella sezione dell'*Ottica* che comprende le cosiddette *Questioni*, e cioè nella sezione conclusiva dell'opera. Prima di entrare nel merito è pertanto giusto riassumere brevemente le due prime sezioni, per la cui stesura Newton rielaborò parte del materiale che egli aveva già trattato nelle *Lezioni di Ottica* svolte a Cambridge tra il 1669 e il 1771.

Il primo libro dell'*Ottica* prende le mosse da alcune definizioni — come ad esempio quella che dice: «Con raggi di luce intendo le minime parti di essa, sia quelle successive lungo le medesime linee, sia quelle contemporanee lungo linee diverse» — e da un gruppo di otto assiomi. Gli assiomi enunciano conoscenze del seguente tipo: «L'angolo di riflessione è uguale all'angolo di incidenza». Seguono le proposizioni e i teoremi, di cui Newton offre dimostrazioni su un piano prevalentemente sperimentale. La *Proposizione II*, ad esempio, detta anche *Teorema II*, recita: «La luce del sole è costituita di raggi differentemente rifrangibili». Newton, dopo averla enunciata, scrive «La prova mediante esperimenti», ed elenca dieci esperimenti favorevoli ad essa.

Il secondo libro è diviso in quattro sezioni, contiene un elenco ragionato di osservazioni sperimentali e fa riferimento a molte questioni di ottica, tra le quali, in particolare, quelle relative ai colori. Nel secondo libro confluiscono materiali già analizzati da Newton nelle *Lezioni di Ottica*. È da notare come Newton non discuta l'interazione tra etere e luce lungo le direttrici esposte a Oldenburg, ma si limiti a porre definizioni come la seguente: «Chiamerò impulsi [fits] alla facile riflessione i ritorni della disposizione di un raggio qualsiasi ad essere riflesso, e impulsi alla facile trasmissione i ritorni della sua disposizione ad essere trasmesso, e chiamerò intervallo fra i suoi impulsi lo spazio esistente tra ogni ritorno e il successivo ritorno». (*Ibid.*, 511).

Il terzo libro inizia con il resoconto di alcuni esperimenti. Dopo poche pagine, tuttavia, Newton scrive di aver dovuto interrompere il lavoro sperimentale e aggiunge: «Concluderò col proporre alcune questioni, confidando nel fatto che da altri vengano compiute ulteriori ricerche» (*Ibid.*, 552). Il lettore si trova pertanto a dover affrontare il gruppo delle *Questioni*.

Non è eccessivo dichiarare che le *Questioni*, in quanto problemi che Newton giudicava aperti, esercitano un vero e proprio fascino. Le *Questioni* comprese tra la prima e la quarta mettono in discussione il rapporto tra la forma geometrica dei raggi luminosi e l'azione che i corpi esercitano sulla luce stessa. Un problema caratteristico è allora quello che Newton pone con

la *Questione 1*: «I corpi non agiscono a distanza sulla luce, e per effetto della loro azione non incurvano i raggi di essa; e questa azione non è (a parità delle altre cose) massimamente forte alla minima distanza?». Ma, se i corpi e la luce interagiscono, «nel passare in prossimità delle estremità e dei lati dei corpi, i raggi di luce non sono incurvati diverse volte avanti e indietro, con un movimento analogo a quello delle anguille?», chiede Newton nella *Questione 3*. E quali fenomeni sono coinvolti nell'azione reciproca? Nella *Questione 5*, allora, Newton s'interroga sull'azione che la luce esercita sui corpi «al fine di riscaldarli e di immettere le parti di essi in un moto vibratorio in cui consiste il calore». La *Questione 6* pone il seguente interrogativo: «I corpi neri non sono riscaldati dalla luce più facilmente di quelli di altri colori, per il fatto che cadendo la luce su essi non viene riflessa all'esterno, ma al contrario penetra nei corpi ed è sovente riflessa e rifratta nel loro interno, finché non viene soffocata e perduta?» (*Ibid.*, 553).

L'edizione in latino del 1706 contiene le *Questioni* numerate dal 17 al 23. Esse riguardano quasi esclusivamente l'etere, trattato da Newton lungo gli schemi già visti in precedenza e messo in discussione in forma interrogativa. Nella *Questione 17* le vibrazioni provocate nell'etere dalla luce sono paragonate a quelle dell'acqua colpita da una pietra, mentre la *Questione 21* pone interrogativi sulle differenze di densità del mezzo etereo contenuto nel sole, nelle stelle, nei pianeti e nelle comete, oppure nel vuoto dello spazio celeste. Nella questione successiva, Newton si chiede se non sia possibile che l'etere abbia una capacità di opporre resistenza al moto dei corpi in misura inferiore a quella dell'aria di circa seicento milioni volte, così da non produrre variazioni notevoli nei moti planetari per periodi di almeno 10.000 anni.

Nell'edizione del 1717 compaiono le ultime *Questioni*. Nella ventisettesima e ventottesima, Newton chiede rispettivamente: «Non sono erronee tutte le ipotesi che, fin qui, sono state inventate per spiegare i fenomeni della luce mediante nuove modificazioni dei raggi?» e «Tutte le ipotesi secondo cui la luce consisterebbe in una pressione o in un movimento propagantesi attraverso un mezzo fluido, non sono erronee?». Nella stessa *Questione 28* Newton ripropone il tema antimeccanicistico, ricordando che «il compito principale della filosofia naturale è di argomentare muovendo dai fenomeni senza immaginare ipotesi, e dedurre le cause dagli effetti, finché arriviamo alla vera Causa prima, che certamente non è meccanica». Ritorna il motivo del mezzo attraverso cui si esercita l'azione gravitazionale, con parole che ricordano la corrispondenza con Bentley: «Che cosa c'è nei luoghi quasi vuoti di materia, e come avviene che il Sole e i pianeti gravitino l'uno verso l'altro senza alcuna materia densa fra loro?» (*Ibid.*, 576).

Le ultime tre *Questioni* sono basilari per capire i dubbi che per decenni hanno agitato la mente di Newton. Le prime due pongono domande

fondamentali. Secondo Newton è legittimo chiedersi se «i raggi di luce non sono corpi molto piccoli emessi da sostanze luminose» e capaci di eccitare «vibrazioni su ciò su cui essi agiscono»: una domanda che dice molto a proposito del ruolo delle ipotesi nella prassi scientifica di un uomo che aveva dichiarato la necessità di bandire le ipotesi d'ogni genere. In secondo luogo Newton chiede: «I grossi corpi e la luce non sono convertibili gli uni nell'altra, e non è possibile che i corpi ricevano gran parte della loro attività dalle particelle di luce che entrano nella loro composizione?». Il quesito sembra avere una risposta positiva: «Il mutamento dei corpi in luce e della luce nei corpi è strettamente conforme al corso della natura, che sembra prediligere le trasformazioni» (*Ibid.*, 580). Si tratta del tema grandioso di una cultura che per secoli, prima di Newton, aveva visto confluire, lungo cammini intellettuali tra loro diversi, argomenti filosofici, esperimenti d'alchimia, tradizioni ermetiche, riflessioni di magia. L'acqua, dice Newton, è un sale che, riscaldato dalla luce, si muta in vapore: ma il freddo la trasforma in quella pietra dura che è il ghiaccio — e tutti gli animali «si sviluppano dall'acqua, dalle soluzioni acide acquose e dai sali, e per effetto della putrefazione tornano di nuovo in sostanze acquose». Così il mercurio si muta in sale, in terra bianca, in cinabro, in vapore — e, «se agitato nel vuoto, brilla come fuoco»: ma alla fine torna nella sua forma primitiva di mercurio. La natura è ricca di «varie e strane trasformazioni».

Come è possibile la produzione dei fenomeni? Con questo interrogativo si apre l'ultima — e forse la più famosa — delle *Questioni*, la trentunesima. In essa i temi delle «varie e strane trasformazioni», della natura come costruzione armoniosa, delle cause agenti, della stabilità nel tempo del sistema del mondo, dell'antimeccanicismo vengono da Newton ripresi al fine di commisurare il rapporto tra ciò che la scienza ha già capito e ciò che invece deve essere ancora indagato.

Le parti più piccole dei corpi, forse, sono dotate di «potenze, virtù e forze» grazie alle quali esse possono interagire fra loro, così da produrre «l'ordine e il corso della natura». L'azione della gravità, del magnetismo e dell'elettricità si manifesta a distanze elevate — altre azioni, invece, possono manifestarsi a distanze molto brevi e comunque tali da essere sino ad ora sfuggite all'osservazione. La complessità dei fenomeni chimici sembra derivare da queste ultime azioni, capaci di aggregare le parti più minute della materia in parti più grandi, sino a raggiungere le dimensioni delle «particelle più grosse da cui dipendono le operazioni chimiche e i colori dei corpi naturali e che, unendosi, formano corpi di grandezza sensibile» (*Ibid.*, 596).

L'argomento già esposto nella *Conclusio* inedita riappare nel momento in cui la *Questione 31* suggerisce la compresenza di azioni gravitazionali tra corpi celesti e di «un'altra forza di attrazione e di repulsione» che opera nei

«movimenti minori delle particelle». Secondo Newton la forza di inerzia, da sola, non può spiegare la ragione per cui nel mondo esiste il moto. D'altra parte, «il movimento può nascere e morire». È dunque necessario pensare che, accanto all'inerzia intesa come principio passivo, esistano dei princìpi attivi: la causa della gravità e la causa della fermentazione e della coesione, connesse ai grandi moti celesti e ai moti minori della materia: «Io considero questi princìpi non come qualità occulte che si immaginano sorgere dalle forme specifiche delle cose — scrive Newton — ma come leggi generali della natura, dalle quali le cose stesse sono formate». Ciò che vi è di occulto non sta nelle leggi, ma nelle loro cause che non sono ancora state scoperte.

La necessità dei princìpi attivi è manifesta. Come sottolinea Newton, «non fosse per questi princìpi, i corpi della terra, dei pianeti, delle comete, del sole, con tutte le cose che sono in essi, si raffredderebbero e congelerebbero, diventando masse inerti; cesserebbe ogni putrefazione, generazione, vegetazione e vita, e i pianeti e le comete non potrebbero rimanere nelle loro orbite» (*Ibid.*, 600).

La grandiosa raffigurazione della natura armoniosa è visibile all'uomo poiché Dio, al principio, formò la materia in particelle, e diede a queste ultime ciò che era indispensabile affinché «meglio tendessero al fine per il quale egli le aveva formate». Non occorre pertanto cadere nell'illusione che il mondo «sia potuto nascere dal caos per effetto di semplici leggi naturali»: esso è nato e si conserva grazie alla sapienza e all'abilità di «un Agente potente ed eterno».

Bisogna conoscere sempre meglio la creazione mediante la filosofia naturale, così da estendere i confini stessi della filosofia morale. Il grande affresco metafisico si chiude su questa prospettiva che l'uomo deve seguire sia per spiegare la natura, sia per diventare sempre più consapevole di se stesso. E il cammino da percorrere è molto: «In questo terzo libro ho soltanto iniziato l'analisi di ciò che rimane da scoprire sulla luce e sui suoi effetti sul sistema della natura» (*Ibid.*, 604).

Chi legge l'*Ottica* o i manoscritti lasciati da Newton non può che rendersi conto di quanti problemi fossero rimasti insoluti accanto a quelli risolti nei *Principia*, e di come Newton stesso fosse cosciente della ampiezza dell'ignoto e delle difficoltà che dovevano ancora essere superate per garantire la validità delle soluzioni date al sistema del mondo. Se si tiene anche conto dei trionfalismi di un certo newtonianesimo di maniera, assai diffuso nel Settecento e nell'Ottocento, credo che non vi sia conclusione migliore per queste pagine di quella che appare dalle seguenti parole di Albert Einstein: «Newton stesso era ben più cosciente della debolezza insita nel suo edificio intellettuale di quanto non lo fosse la generazione di dotti scienziati che gli seguì. Questo fatto ha sempre destato la mia più profonda ammirazione».

BIBLIOGRAFIA

Testi

B. Le Bovier de Fontenelle, *The elogium of Sir Isaac Newton*, in I.B. Cohen, *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy and related documents*, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1978.

I. Newton, *Princìpi matematici della filosofia naturale*, a cura di A. Pala, Torino, UTET, 1965.

Id., *Scritti di ottica*, a cura di A. Pala, Torino, UTET, 1978.

Studi

Z. Bechler, (a cura di), *Contemporary newtonian research*, Dordrecht, Reidel, 1982.

P. Casini, *Newton e la coscienza europea*, Bologna, Il Mulino, 1983.

I.B. Cohen, *Isaac Newton's papers & letters on natural philosophy and related documents*, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1978.

Id., *The newtonian revolution With illustrations of the transformation of scientific ideas*, Cambridge, Cambridge University Press., 1980 (trad. it.: *La rivoluzione newtoniana. Con illustrazioni della trasformazione di idee scientifiche*, Milano, Feltrinelli, 1982).

E. Grant, *Much ado about nothing. Theories of space and vacuum from the Middle Ages to the Scientific Revolution*, Cambridge, Mass., Cambridge University Press, 1981.

R.A. Hall, *From Galileo to Newton, 1630-1720*, London, William Collins Sons & Co.Ltd., 1963 (trad. it.: *Da Galileo a Newton, 1630-1720*, Milano, Feltrinelli, 1973).

Id., *Philosophers at war The quarrel between Newton and Leibniz*, Cambridge, Mass., Cambridge University Press, 1980 (trad. it.: *Filosofi in guerra. La polemica tra Newton e Leibniz*, Bologna, Il Mulino, 1982).

R.H. Hall e M. Boas Hall, *Unpublished scientific papers of Isaac Newton*, Cambridge, Mass., Cambridge University Press, 1978.

R.H. Kargon, *Atomism in England from Hariot to Newton*, Oxford, Clarendon Press, 1966 (trad. it.: *L'atomismo in Inghilterra da Hariot a Newton*, Bologna, Il Mulino, 1983).

A. Koyré, *Newtonian studies*, Cambridge, Mass., Harvard University Press, 1965.

T.S. Kuhn, *Newton's optical papers*, 1978, in I.B. Cohen, *Isaac Newton's papers & letters*, cit., pp. 27-45.

A. Pala, *Isaac Newton, scienza e filosofia*, Torino, Einaudi, 1969.

A. Thackray, *Atoms and powers An essay on newtonian matter-theory and the development of chemistry*, Cambridge, Mass., Harvard University Press., 1970 (trad. it.: *Atomi e forze Studio sulla teoria della materia in Newton*, Bologna, Il Mulino, 1981).

C. Truesdell, *A program toward rediscovering the rational mechanics of the Age of Reason*, in «Archive for History of Exact Sciences», *I*, 1962, 1-36

R.S. Westfall, *Force in Newton's physics*, New York, Science History Publications, 1971 (trad. it.: *Newton e la dinamica del XVII secolo*, Bologna, Il Mulino, 1982).

Id., *Never at rest A biography of Isaac Newton*, Cambridge, Cambridge University Press, 1980.

D.T. Whiteside (a cura di), *The mathematical papers of Isaac Newton*, Cambridge, At the University Press, 1976-81, 8 voll.

Nell'indice che segue, per i nomi degli scienziati più significativi e dei quali si tratta più diffusamente viene fornita, oltre ai consueti rimandi di pagina, un'indicazione sommaria dei principali argomenti esaminati. L'indicazione dell'argomento, fra parentesi, si riferisce a tutti i numeri di pagina, separati da virgola, che precedono la parentesi. I numeri di pagina privi di indicazioni tra parentesi s'intendono rimandi a trattazioni di carattere generale o a passi in cui il nome è citato in incisi, per confronti ecc.

G

Diretta da
Paolo Rossi

1

La rivoluzione
scientifica:
dal Rinascimento
a Newton

STORIA della SCIENZA

Diretta da
Paolo Rossi

STORIA *della* SCIENZA

1
La rivoluzione scientifica: dal Rinascimento a Newton

GRUPPO EDITORIALE L'ESPRESSO